

Assessment of thermal characteristics of lakes in the permafrost zone by mathematical modelling (on the example of lakes in Yakutia)

Kondratyev S.A., Golosov S.D., Zverev I.S., Rasulova A.M. *, Krylova V.Yu., Revunova A.V.

Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, Sevastyanova, Str., 9, St. Petersburg, 196105, Russia

ABSTRACT. The purpose of the study is to identify the possibilities of mathematical modeling in solving problems of quantitative assessment and prediction of hydrothermodynamic characteristics of lakes of different origins in the permafrost zone based on available information about their morphometry. The object of the study is 420 of morphometrically studied lakes in Yakutia of different genetic origin. The choice of an adequate hydrothermodynamic model of processes in the “atmosphere – lake – bottom sediments” system, as well as sources of information on the atmospheric impact on lakes (reanalysis and climate prediction) for the studied region was substantiated. Simulation calculations were carried out to assess the retrospective interannual and intraannual dynamics of abiotic processes in water and bottom sediments of lakes located in the permafrost zone of different climatic regions of Yakutia. To assess the interannual dynamics of the studied processes in water and bottom sediments of thermokarst lakes located in permafrost zones and being the most widespread in the region, forecast calculations were carried out. In this case, two RCP scenarios for the evolution of anthropogenic greenhouse gas emissions into the atmosphere in the future were used – “best” and “worst” in terms of environmental impact. The prospects for further use of modeling methods in the creation of a system of remote monitoring of unstudied and poorly studied lakes in the Arctic regions of the Russian Federation was assessed.

Keywords: lake, mathematical model, heat transfer in water and bottom sediments, permafrost, reanalysis, climate scenario

For citation: Kondratyev S.A., Golosov S.D., Zverev I.S., Rasulova A.M., Krylova V.Yu., Revunova A.V. Assessment of thermal characteristics of lakes in the permafrost zone by mathematical modelling (on the example of lakes in Yakutia) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 6. - P. 1380-1398. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-6-1380

1. Introduction

At present, the absolute majority of lakes with an area of up to 100 km² in the permafrost zone of Russia can be categorized as unstudied, since no contact measurements are carried out on them. (Rumyantsev et al., 2021). The reason for this is their abundance and inaccessibility. With the development of technology, it has become possible to obtain information about inaccessibility lakes without carrying out laborious and expensive contact measurements, using remote sensing methods (active and passive). The use of remote sensing data makes it possible to determine the depth of a lake (including bathymetry), measure water temperature, monitor ice formation, observe changes in the coastline and area of water bodies, study the flora and fauna of lake ecosystems, which is extremely import-

ant for assessing the state of the ecosystem, and much more. This approach significantly expands the possibilities of studying lakes in the permafrost zone, providing valuable data for environmental monitoring. However, the use of remote sensing is limited by many factors, the main of which are the resolving power of sensors that makes it difficult to study small-scale objects and processes (usually less than 10–30 m²) and the depth of penetration of electromagnetic radiation into a body of water, which prevents the obtaining of information on thermal processes in the water depth. The lack of information on the water mass of numerous lakes negatively affects the planning of economic activities in the northern regions, as well as on the scientific validity of forecasts of possible changes in the characteristics of lakes and their bottom sediments under the conditions of climate changes.

*Corresponding author.

E-mail address: arasulova@limno.ru (A.M. Rasulova)

Received: July 23, 2024; **Accepted:** October 24, 2024;

Available online: December 25, 2024

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



Currently, from the 723 thousand lakes in the Republic of Sakha (Yakutia), information about their depth and surface area is available for less than 500 ones, which are considered morphometrically studied (Balatsenko, 2016). At the same time, the lakes of the republic are used for water supply, drainage, fishing, recreation, spropel extraction, as well as in many other areas of human activity that require information about the characteristics of their water mass and bottom sediments.

The purpose of the study is to identify the possibilities of mathematical modeling in solving problems of quantitative assessment and prediction of hydrothermodynamic (HTD) characteristics of lakes of different origin in the permafrost zone based on available information on their morphometry. The object of the study is 420 genetically different lakes in Yakutia, the morphometry of which is described in the work (Balatsenko, 2016).

2. Object of study

Yakutia covers an area of about 3.1 million km². In the north, the territory is washed by the Laptev and East Siberian seas. The relief forms of the underlying surface are varied. Two main areas can be distinguished: western platform and eastern geosynclinal, which were formed during the Cenozoic Era under the influence of Alpine Mountain formation, secular fluctuations of the earth's crust, flowing waters, glaciers, thermokarst and other processes (Nestereva, 2011; Balatsenko, 2016). Lakes are located in different physical-geographical and climatic conditions, which affect on the origin and structure of their basins, and, accordingly, the HTD processes in lakes, as well as the functioning of ecosystems. One of the features of Yakutia is permafrost. Most of the territory of Yakutia (90%), except the southwestern and southern parts, is located in a zone of continuous permafrost, the thickness of which depends on the climate, terrain, nature of soil and vegetation cover, composition and structure of rocks, slope exposure and other natural conditions. The greatest thickness reaches up to 1500 m in the upper river of the Markha River (the left tributary of the Vilyui River). The entire northern and partly central part of Yakutia is a zone of continuous permafrost with a thickness of 400 m and more. In the southern and southwestern parts of Yakutia, an intermittent distribution of permafrost with a thickness of up to 60 m is observed.

The climate of Yakutia is sharply continental, subarctic and arctic in the north and islands. For the most part of Yakutia (Central Yakut Lowland) winter is long, severe, with little snow and an anticyclonic weather regime. January temperatures range from -26°C to -68°C. Summer is short but warm and arid, with July temperatures ranging from 2°C to 38°C. Due to the characteristics of the relief and distance from the sea, the climate has its own characteristics in different parts of the republic. Thus, a milder climate is observed on the East Siberian Platform. The main climatic regions of Yakutia are shown in Fig. 1.

The Fig.1 shows the location of the centroids (centers of mass) of the indicated areas, the location

of which will be used in subsequent calculations. The coordinates of the centroids of each of the climatic regions (135.905985° E, 71.075318° N – region 1, 130.522173° E, 66.934360° N – region 2, 124.756209° E, 60.887526° N – region 3) were determined using the QGIS program. Each centroid represents the barycenter of the climate region layer, its coordinates are the average values of the coordinates of all nodes of the polygon.

The morphometry of lakes reflects both the specific evolution of the basin and the processes occurring in the water column and bottom sediments (Adamenko, 1985; Muravevsky, 1960; Nezhikhovskiy, 1973; Nestereva, 2011; Balatsenko, 2016). The most common types of lakes according to morphogenetic classification (Zhirkov, 1983) include thermokarst, erosion-thermokarst, water-erosion, glacial, tectonic and other less common types. The main morphometric characteristics of lakes are average and maximum lake depth, lake surface area, water mass volume, length and indentedness of the shoreline and shape of the lake basin. Table 1 presents the values of average lake depth (H, m), lake surface area (A, km²) and lake water mass volume (V, km³) for different types of morphometrically studied lakes in Yakutia (Balatsenko, 2016). Typically, lake modeling uses the average depth of water bodies of the same morphogenetic origin as input parameters. However, as a rule, not all morphometric parameters are known for all lakes. The mutual conditioning of the genetic origin of the lake and the shape of its basin determines the correlation between the morphometric parameters of water bodies of same origin. Due to this it is possible to approximately estimate the missing morphometric characteristics of lakes based on one or more known parameters in a group of water bodies homogeneous in genetic origin. Thus in (Balatsenko, 2016) contains empirical geostatistical relationships linking lake water volume to area. Such dependencies can be used to quantify other morpho-

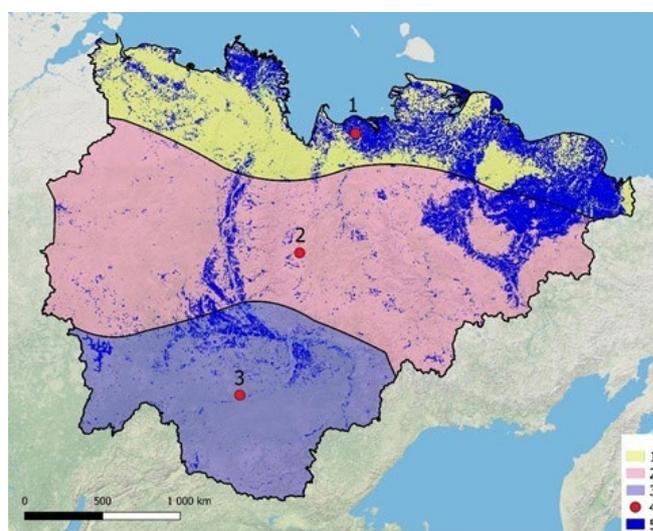


Fig.1. Climatic regions on the territory of the Republic of Sakha: 1 – climate of arctic deserts and tundras, 2 – temperate continental climate with sufficient moisture, 3 – taiga climate with stable moisture (National Atlas..., 2007), 4 – centroids of climatic regions, 5 – lakes

Table 1. Average values of the main morphometric characteristics of lakes of Yakutia with different genetic types of origin (Balatsenko, 2016)

Origin of the lake basin	Number of lakes	H, m	A, km ²	V, km ³	V = f(A)
Thermokarst	231	1.4	0.8	0.001	$V = 0.0024A^{1.14}$
Erosion-thermokarst	95	1.9	3.0	0.011	$V = 0.0012A^{1.06}$
Water-erosion	90	1.1	0.28	0.0004	$V = 0.0036A^{1.2}$
Tectonic	8	34.2	36.3	1.64	$V = 0.085A^{3.2}$
Glacial	17	4.3	35.5	0.15	$V = 0.085A^{3.2}$

metric characteristics of lakes, such as depth.

As can be seen from the sample under consideration, lakes of *thermokarst* origin are the most widespread in Yakutia. These lakes are mostly small in size and have a round-oval shape. Their depths are equal to 1–3 m and only in some lakes reach 10–15 m. *Water-erosion* lakes include floodplain, river and lakes located in deltas or at river mouths. These lakes are formed as a result of the separation of channels (branches) and sections of the old channel (old channels) from the river, or by flooding of low areas by hollow water. Lakes of water-erosion origin are distributed along rivers, they are characterized by an oblong shape and small depth (0.9–3.6 m) and area (0.01–2.39 km²) (Gorodnichev et al., 2020). *Erosion-thermokarst* lakes were formed in the ancient valleys of large rivers, on the terraces of the middle and upper complexes. These are the largest lakes in the region, which, as they rise to higher hypsometric levels, lost obvious signs of erosional origin and acquired rounded and rounded-elongated outlines. Lakes of *glacial* origin represent traces of stay and movement of glaciers of the Quaternary period in the form of scars, ram's foreheads, which are clearly visible on rocky shores and islands. The shores of the lakes are composed mainly of hard rocks, which is weakly erodible, which is one of the reasons for the weak sedimentation process. Lakes of *tectonic* origin are characterized by the greatest depth and transparency, most of them are flowing. They are formed in places of fractures and shifts of the Earth's crust. As a rule, they are deep narrow water bodies with steep bluff and rocky banks, located in deep through gorges (Balatsenko, 2016).

3. Materials and methods

One of the main purposes of mathematical modeling of natural processes is to carry out simulation and prognostic calculations that allow us to go beyond the limits of a possible field experiment (Samarsky, 1983; Kondratyev, 2007). In order to achieve the set goal, i.e., to identify the modeling capabilities in assessing the HTD characteristics of lakes of different origin in permafrost conditions, as well as their possible changes as a result of climatic impacts, the following tasks were solved:

- Selection of an adequate model of HTD processes in the system “atmosphere – lake – bottom sediments”, as well as sources of information on the atmospheric impact on lakes (reanalysis, climatic

prediction) for the studied region.

- Simulation calculations to assess retrospective interannual and intra-annual dynamics of HTD processes in water and bottom sediments of lakes located in the permafrost zone of different climatic regions of Yakutia. The calculations were performed for hypothetical lakes with average characteristics from Table 1, located at the points with the coordinates of centroids of climatic regions.
- Carrying out prognostic calculations to assess interannual and intra-annual dynamics of HTD processes in water and bottom sediments of the most widespread thermokarst lakes located in the permafrost zone of different climatic regions of Yakutia. The calculations were performed for hypothetical lakes with average characteristics (Table 1), located at points with the coordinates of the centroids of climatic regions (Fig. 1), and using different climate change scenarios in the region.
- Assessment of prospects for further use of modeling methods in the creation of a system for remote monitoring of unstudied and poorly studied lakes in the Arctic regions of the Russian Federation.

Selection of a model of HTD processes in the system “atmosphere – lake – bottom sediments”, as well as sources of information on the atmospheric impact on lakes. The lakes of Yakutia considered in this work, located in the zone of permafrost occurrence, have one important feature – they almost always have horizontal homogeneity of the temperature field and predominance of vertical variability of thermal characteristics of the water mass over horizontal variability (Pavlov, 1999). When modeling the thermal regime of water bodies of this class, it is often sufficient to use simple one-dimensional models based on the integration of the vertical heat diffusion equation and various ways of representing the vertical temperature distribution. Such models, as a rule, are based on fundamental physical laws, do not require specifying the vertical turbulent exchange coefficients, are easy to implement and convenient for numerical experiments. One such model is Lake (Mironov, 2008).

The hydrothermodynamic model of lake FLake¹ is an integral part of the proposed methodology and was developed by joint efforts of the staff of the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, the Northern Water Problems Institute of the Russian

¹ HTD model Flake <https://www.lakemodel.net> (date accessed 15.03.2024) (Mironov, 2008)

Academy of Sciences, the Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries of Germany (IGB) and the German Weather Service (DWD) (Mironov, 2008; Mironov et al., 2010; Golosov and Kirillin, 2010; Kirillin et al., 2011). The model is a universal parameterized one-dimensional mathematical model of HTD processes in the lake, which implements the results of research obtained during many years of in-situ and laboratory research performed at the Limnological Station of the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, as well as the latest world achievements in the field of physical limnology. For successful use of the model, the modeling object should meet the following basic requirements:

- the extent should not be so large as to generate significant climatic differences between individual sections of the water area, and not so small that secondary wind circulation plays a very significant role;
- the bottom can be approximated by a horizontal plane;
- advective processes should not contribute significantly to turbulent mixing.

Currently, FLake serves as a basic tool for developing models of aquatic ecosystems functioning and water quality formation in natural and artificial water bodies, and is used as a textbook for training ecologists and hydrometeorologists both in our country and abroad. The product of a synthesis of the lake model FLake and near-surface reanalysis meteorological data was named FLake-Global (Kirillin et al., 2011). It is noted that FLake-Global allows almost instantaneous estimation of the seasonal cycle of temperature and mixing conditions in any shallow freshwater lake around the world. As a method of taking into account the influence of lakes on the formation of local climatic conditions, the FLake model is widely implemented in the practice of numerical weather forecasting in meteorological organizations of different countries and in the International European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (Mironov, 2008). The European forecasting system COSMO², which is used in our country for weather forecasting by Hydrometcenter of Russia for the whole territory of the Russian Federation, also includes FLake as a means of assessing the impact of freshwater lakes on the local climate around the world. It follows that the model can be used a priori on unstudied small and medium-sized water bodies of our country.

In addition, the authors' previous studies, carried out jointly with colleagues from the Northern Water Problems Institute, Karelian Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences and St. Petersburg State University (Zdorovenov et al., 2020), presented the results of FLake model verification on the lakes of Samoilovsky Island, located in the southern part of the Lena River delta. The island contains several lakes of predominantly thermokarst origin. To verify the model,

we used the results of measurements of lake ice thickness, bottom and surface temperatures of four lakes in April 2013, conducted by a team of specialists from the Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research (AWI, Potsdam, Germany) as part of the "Lena" expedition (Zdorovenov et al., 2020).

Meteorological reanalysis data were used to set the atmospheric forcing on the lakes. Reanalysis combines deterministic modeling data with in-situ observations from around the world into a globally complete and consistent data set. The principle of this data combination is based on data assimilation used in numerical weather prediction centers, where every few hours the previous forecast is optimally combined with newly available observations to produce a new best estimate of the state of the atmosphere. In this case, reanalysis is not associated with the need to promptly issue weather forecasts, and thus there is more time to collect observations and to incorporate improved versions of the original observations, which favorably affects the quality of the reanalysis product.

In the present work, we used data from the ERA5³ family reanalysis as input information for hydrothermodynamic modeling. The ERA5 reanalyses contain a series of reconstructed meteorological parameter values for the entire globe that are updated daily with a delay of about 5 days. ERA5 is the fifth generation of reanalysis for global climate and weather over the past 8 decades. Data are available from 1940 to the present. The ERA5 provides hourly estimates for a large number of atmospheric parameters, of ocean waves and the surface of the Earth. The time step between "observations" is 6 hours, the spatial resolution of the reanalysis is 0.25° in latitude and longitude. The data required for the calculations are sampled using the coordinates of the calculated point. To facilitate the work of many climate applications, monthly averages of hydrometeorological parameters are also calculated. When modeling HTD processes in hard-to-reach regions, reanalysis data are used instead of missing measurement data.

Climate change scenarios in the region. In order to assess the consequences of possible climate changes, two scenarios for the evolution of anthropogenic greenhouse gas emissions into the atmosphere in the future, the so-called RCP (Representative Concentration Pathway) scenarios – RCP 2.6 and RCP 8.5 – have been developed, which represent the "best" and "worst" scenarios in terms of environmental impact, respectively (Meinshausen, 2011; Moss, 2010; Nakicenovic and Swart, 2000; Rogelj et al., 2012). The RCP 2.6 scenario requires that carbon dioxide (CO₂) emissions begin a steady decline and reach zero by 2100. Methane (CH₄) emissions should decrease by half, with sulfur dioxide (SO₂) emissions at about 10% of 1980–1990 levels. In the RCP 8.5 scenario, emissions continue to increase throughout the 21st century at the same rate they are today. The numbers in the scenario abbreviations (2.6 and 8.5) indicate the additional amount of energy (W/m²) that would be stored

² COSMO forecast system, Roshydromet. <https://www.meteorf.gov.ru/product/cosmo/> (date of access 15.03.2024) (Rockel et al., 2008).

³ ERA5 website <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5> (accessed 15.03.2024) (Hersbach et al., 2020).

by the atmosphere as a result of greenhouse gas emissions. The values of the meteorological parameters (precipitation and air temperature) corresponding to the realization of scenarios of human socio-economic activity RCP in the study region for the period up to 2100 were calculated using the MPI-ESM-MR climate model (Max Planck Institute, Germany) participating in Phase 5 of the World Climate Research Program Model Intercomparison Project (WCRP CMIP5) and recommended in the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)⁴. The data required for the calculations were obtained by submitting an appropriate request including the coordinates of points of interest (in our case, the coordinates of the centroids of climatic regions), the name of climate models (MPI-ESM-MR), the type of RCP scenario (RCP 2.6 and RCP 8.5), the names of meteorological variables, and the temporal resolution of the data on the website of the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (CORDEX..., 2021). The baseline information for climate projections consists of hydrometeorological parameters (RCP scenarios) for the period 2006–2100.

For simulation calculations, the hydrometeorological information from the reanalysis and climate forecasts were combined. The RCP scenarios were adapted to retrospective reanalysis data using the method of adjusting the values of climatic parameters calculated by the MPI-ESM-MR model for the period 2006–2022 according to the reanalysis data for the same time period. The method is based on the use of relations linking the values of reanalysis (analog of measured climatic parameters) and those calculated by the atmospheric general circulation model (Kondratyev and Bovykin, 2003).

If the necessary initial information is available, the model calculates the following characteristics of the selected lake:

- heat transfer between the atmosphere, ice, water and bottom sediments;
- vertical profile of water temperature, temperature at the surface and at the bottom;
- temperature profile in bottom sediments;
- date of ice cover formation, its duration and thickness;
- thawing depth of bottom sediments in lakes in the permafrost zone.

4. Results and their discussion

The possibilities of mathematical modeling in solving the problems of quantitative assessment and forecasting of possible changes in the HTD characteristics of lakes of different origin in permafrost conditions on the basis of information on their morphometry are demonstrated on the example of solving the following three simulation modeling problems:

- Calculation of intra-annual dynamics of HTD char-

acteristics of water mass and bottom sediments in different climatic regions of Yakutia.

- Calculation of intra-annual dynamics of HTD characteristics of water mass and bottom sediments in lakes of different origin.
- Retrospective and prognostic assessment of the dynamics of the average annual HTD characteristics of lakes for the period 1940–2100.

The depth values of the first three lake types (thermokarst, water-erosion, and erosion-thermokarst) are close to each other (Table 1). Their differences do not significantly affect the modeling results. Therefore, only thermokarst lakes were considered in the following calculations, as prevalent in the sample under consideration. The modeling was performed for hypothetical lakes located at the points with the coordinates of centroids of the climatic regions, with average values of morphometric characteristics contained in Table 1.

Calculation of intra-annual dynamics of HTD characteristics of water mass and bottom sediments in different climatic regions. The HTD simulation modeling of water mass and bottom sediments was carried out on the example of a thermokarst lake in the climatic regions of arctic deserts and tundras, continental climate with sufficient moisture, and taiga climate with stable moisture (Fig. 1). The impact of climate in this task on the HTD characteristics of water mass and bottom sediments is realized through hydrometeorological information of reanalysis for centroids of the mentioned climatic areas. The results of simulations averaged over the period 1940–2022 are presented in Fig. 2.

The data of Fig. 2 demonstrate the zonality of intra-annual variations in the depth-averaged water temperature, ice thickness and heat flux between water, and bottom sediments in a thermokarst lake of three main climatic regions of Yakutia. The warmest lakes are in region 3, with a taiga climate and stable

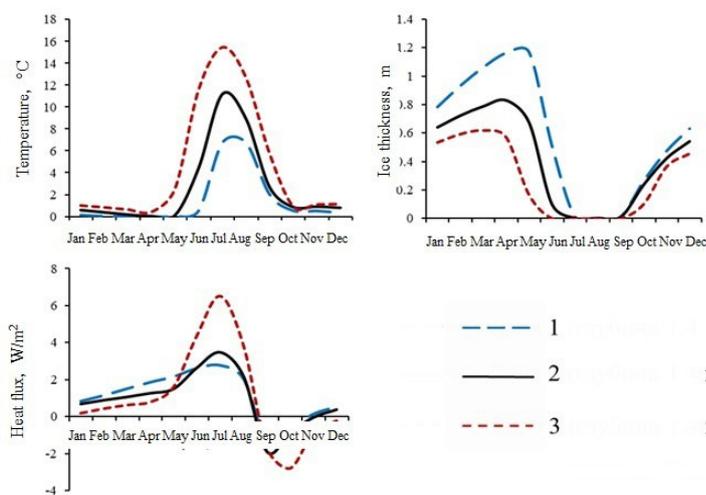


Fig.2. Intra-annual dynamics of HTD characteristics of water mass and bottom sediments (depth-averaged water temperature, ice thickness and heat flux between water and bottom sediments) averaged over the period 1940–2022 in thermokarst lakes of the regions with: 1 – Arctic desert and tundra climate, 2 – temperate continental climate with sufficient moisture, 3 – and taiga climate with stable moisture

⁴ Link to the report <https://www.ipcc.ch/sr15/> (date of access 15.03.2024)

humidification; summer temperatures here can reach 16°C. They are followed by water bodies of region 2 with moderate continental climate and sufficient moisture. The lowest water mass temperatures (no more than 6–7°C in summer) are characteristic of lakes of the region with the climate of Arctic deserts and tundras. The result is rather predictable taking into account latitudinal location of climatic areas. However, the temporal dynamics of water temperature in lakes located in permafrost-covered regions in winter differs significantly from that in lakes without permafrost. In the latter, the ice-free period is characterized, as a rule, by the effect of “subglacial warming” of the water mass due to heat redistribution between warm bottom sediments and cold overlying water. As a result, in such lakes the water temperature under the ice increases in winter. This effect is very weakly expressed in lakes with permafrost. It is observed only in the first weeks of ice formation, when the heat flux is negative (directed from bottom sediments to water), then the heat flux changes its sign and becomes positive, i.e. directed from water to bottom sediments. At the same time, the temperature of the water mass under ice decreases. This is because, firstly, the summer warming season in lakes with permafrost is short – only about two months, which does not allow to significantly increase the heat content of bottom sediments. Secondly, the influence of permafrost with negative temperatures is affected. A significant part of heat during the summer warm-up period is spent on heating and thawing of the ice fraction of the permafrost. As a result, the heat coming from the water mass is spent first on the formation of the seasonal thawing layer (STL) and only then on the direct heating of the bottom sediments themselves. With the formation of ice cover, the small amount of heat accumulated in the STL during the summer warming period is quickly consumed for minor heating of bottom water, after which the STL degrades and the heat flux changes direction from negative to positive.

Seasonal dynamics of ice cover thickness in lakes with permafrost differs from that in lakes without permafrost only in quantitative parameters. Here it is necessary to note a long period of ice formation – up to 10 months, and a large ice thickness – average values for the period under consideration are up to 1.5 m. No qualitative differences are observed. The results of the calculation of heat exchange through the boundary “water-bottom” demonstrate the influence of permafrost on the thermal regime of lakes. In lakes of all climatic regions the heat flux has positive values for a considerable part of the year, i.e. it is directed from the water to the bottom. And only in a short time interval in early fall, when the ice formation period begins, it becomes negative, i.e. it is directed from the bottom sediments to the water (see above).

Calculation of intra-annual dynamics of HTD characteristics of water mass and bottom sediments in lakes of different origin. The HTD modeling of water mass and bottom sediments was carried out for three types of lakes with the most different depths – thermokarst, glacial and tectonic with average morphometric characteristics (Table 1) for region 2b of conti-

ental climate with sufficient moisture. The impact of lake type in this problem on the HTD characteristics of water mass and bottom sediments is realized through differences in the average depths of lakes of the indicated types. The results of simulations averaged over the period 1940–2022 are presented in Fig. 3.

The origin of the lake determines the specificity of its basin development and such an important morphometric characteristic as the average depth, which is an input parameter of the FLake model. As follows from Table 1, the depth values of different lake types differ significantly from each other, which affects the modeling results. The threefold increase in the depth of glacial lakes compared to thermokarst lakes leads to significant differences in their thermal regime in the subglacial period. In a thermokarst lake with a smaller volume of water mass, the heat reserve decreases faster due to the influence of negative-temperature permafrost, so that the water temperature approaches zero values at the end of the ice-out period. In glacial lakes, the temperature also decreases, but at a slower rate, and remains positive by the end of the ice-out period. The latter affects the starting conditions of the beginning of summer warming of both types of lakes. Thermokarst lakes start warming up from almost zero temperature values, while glacial lakes start warming up from positive values. This is one of the reasons for the fact that water in glacial lakes in general reaches higher temperatures during summer warming compared to thermokarst lakes. The simplest estimation shows that the heat reserve of an average statistical thermokarst lake by the end of the winter period (calculated according to Table 1) is more than three times less than the heat reserve of a glacial lake – $1.6 \cdot 10^9$ and $5 \cdot 10^9$ J/m², respectively. Another possible reason for more efficient heating of glacial lakes may be the conditions of water mass mixing in lakes of both types. In shallow thermokarst lakes during the period of summer warming, night convective cooling is more effective, which in turn affects the rate of water mass warming. Deep

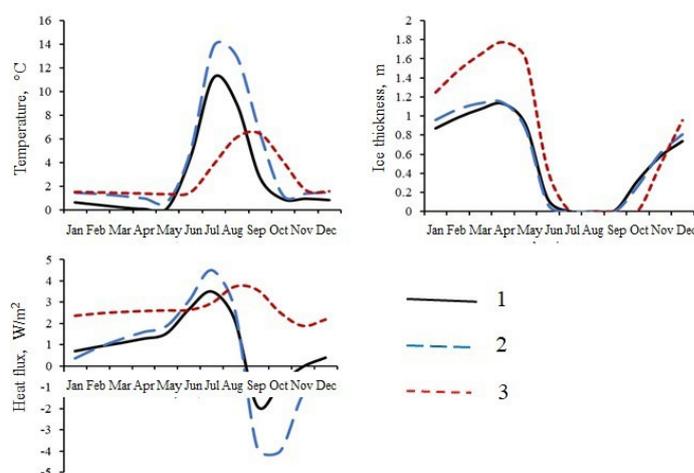


Fig.3. Intra-annual dynamics of HTD characteristics of water mass and bottom sediments (water temperature, ice thickness and heat flux between water and bottom sediments) averaged over the period 1940–2022 in thermokarst – 1, glacial – 2 and tectonic – 3 lakes of the region with moderate continental climate and sufficient moisture.

tectonic lakes warm up much slower compared to the previous types of lakes. The maximum of water temperature in them falls on the end of August – first half of September (in thermocast and glacial lakes the maximum falls on the end of July – beginning of August). At the same time absolute values of water temperature are much lower compared to other types of lakes – only 6°C, while in thermokarst and glacial lakes – 12–14°C. Due to the great depth, the effect of winter influence of the MMP in tectonic lakes is practically imperceptible. Late warming of the water mass in a deep tectonic lake leads to a temporary shift in the timing of the ice formation start – practically by a month. Since ice formation starts at significantly negative values of air temperature, the ice formation rate exceeds that in thermokarst and glacial lakes. This leads to the fact that, in general, ice thickness in tectonic lakes is greater than in thermokarst and glacial lakes.

Heat exchange through the water-bottom interface in tectonic lakes is also very different from that in thermokarst and glacial lakes. In the latter two types of lakes, the character of heat exchange through the bottom sediment surface differs only in quantitative parameters – in glacial lakes it is slightly more intensive. In tectonic lakes, due to the negative temperatures of the permafrost throughout the year, the heat flow is directed from the water mass to the bottom sediments. At the same time, there is no noticeable temperature decrease in winter. The point is that due to the great depth the mixing processes in tectonic lakes are suppressed and heat exchange is carried out by an extremely slow molecular mechanism. Nevertheless, intensification of heat exchange through the water-bottom interface occurs after reaching the temperature maximum with the beginning of autumn cooling, when at density convection mixing penetrates the bottom regions, due to which heat exchange is intensified.

Retrospective and prognostic assessment of the dynamics of annual average HTD characteristics of lakes for the period 1940–2100. Calculations were performed for a lake of glacial origin located in climatic region 2 (Fig. 1) with average morphometric characteristics (Table 1). Retrospective dynamics of mean annual water mass temperature and mean ice cover thickness for the period 1940–2022 were modeled using information from the hydrometeorological reanalysis. Further up to 2100, the data of climatic forecasts (RCP 2.6 and RCP 8.5) for the considered climatic area were used as input information in the calculations. The results of simulations performed for the entire period 1940–2022 are presented in Fig. 4.

The presented figure clearly shows the trends of retrospective changes in the thermal characteristics of lakes under the conditions of changing climate from 1940 to the present. The average lake water mass temperature increased by 0.7°C, while the ice cover thickness decreased by 0.06 m. Further, the change in the HTD characteristics of the lake significantly depends on the climate development scenarios. According to the “worst” scenario (RCP 8.5), when greenhouse gas emissions continue to increase throughout the 21st century, a further increase in lake water mass temperature of another 1.5°C by 2100 is possible. Ice cover thickness

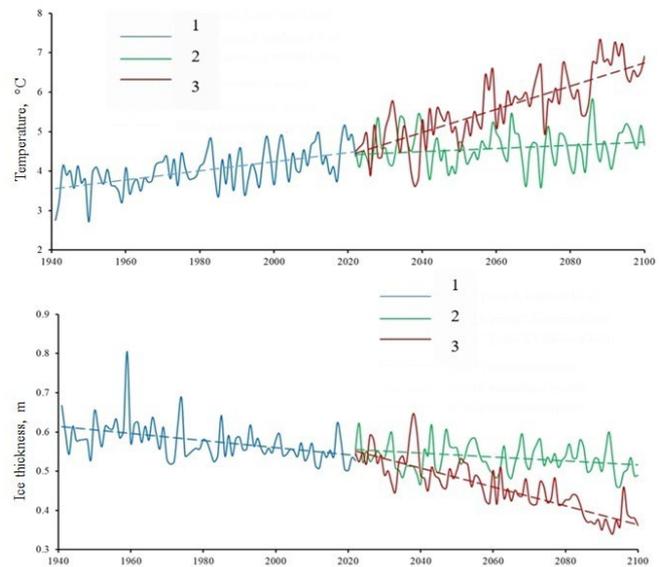


Fig. 4. Retrospective – 1, and prognostic – 2 (RCP 2.6), 3 (RCP 8.5) estimates of the dynamics of mean annual HTD characteristics (mean annual water mass temperature and mean ice cover thickness) of glacial lakes in region 2 (Fig. 1) for the period 1940–2100

would decrease by 0.10 to 0.15 m. The “best” climatic scenario (RCP 2.6), according to which carbon dioxide emissions into the atmosphere will reach zero by 2100, can substantially stabilize the dynamics of changes in the HTD characteristics of the considered hypothetical lake. The situation with ice thickness of different types of lakes in the considered climatic regions of Yakutia fully corresponds to the modern concepts of warming in the Arctic. Ice thickness decreases in all water bodies, with ice formation, growth and melting in lakes is mainly the result of water mass interaction with the atmosphere.

In connection with the obvious influence of possible climate warming on the dynamics of ice cover thickness in lakes, the question arises about the impact of such warming on permafrost, which is a component of bottom sediments. The point is that the water mass of any water body, including lakes, is a natural heat insulator between the atmosphere and bottom sediments. In addition, such a heat insulator also has an abnormally high heat capacity. Atmospheric warming will lead to some increase, first of all, of the surface temperature in lakes, which will most likely increase vertical density stratification in them, thus strengthening the insulation of bottom layers from atmospheric heat penetration into them. Absolute values of heat flux through the water-bottom interface is extremely small – up to 10 W/m² (Fig. 2, 3), moreover, during the year it can be multidirectional, i.e. the total heat flux directed to the bottom sediments will be even less. Thus, it can be assumed that climate warming will have practically no effect on the permafrost beneath the lakes.

It is reasonable to assume that the situation with climate change as a result of human activity will proceed according to some intermediate scenario. In addition, it is important to remember that the theoretical aspects of the impact of climate change on the environ-

ment and water systems in particular are under intensive development. It is very likely that new greenhouse gas emission scenarios and climate models will be developed in the near future. Therefore, it is necessary to be prepared to refine predictive assessments of the impact of future climate change on water systems.

The presented results of simulation and prognostic modeling confirm a wide range of FLake model capabilities in solving problems of quantitative assessment and forecasting of changes in HTD processes in lakes of different origin, located in various physical-geographical and climatic conditions under the lack or absence of in-situ observations. Thus, one of the main purposes of modeling is realized – to go beyond the limits of possible in-situ experiment.

5. Conclusion

As a result of a set of simulation and prognostic calculations, the prospects for further use of modeling methods in solving the problems of estimating the HTD characteristics of different types of unstudied and poorly studied lakes in various climatic regions of Yakutia have been shown. Having a universal and widely tested mathematical model of HTD processes in lakes FLake, which is successfully used in the preparation of weather forecasts by Hydrometcenter of Russia, we can talk about real prerequisites for the creation of a system of remote monitoring of lakes in the Arctic regions of the Russian Federation. The main stages of creating such a system are summarized in the following steps:

- Using remote sensing of the Earth's surface, the water body of interest is interpreted, its geographical coordinates and water surface area are found.
- Based on geostatistical relationships between the morphometric characteristics of a homogeneous group of water bodies, the lake depth is estimated.
- According to the geographic coordinates of the water body, meteorological information of the required resolution is extracted from the databases of meteorological reanalysis and climate modeling for subsequent retrospective and prognostic calculations.
- Lake depth and meteorological parameters are input data for calculations of heat exchange in the system “atmosphere – water mass – bottom sediments”, mixing conditions and vertical temperature distribution in water and bottom sediments, as well as lake ice regime according to the FLake model. At the same time, the prognostic calculations will make it possible to assess the main trends of changes in the HTD parameters of lakes under the realization of different climate change scenarios in the region.

The scheme of estimation and forecasting of changes in HTD characteristics of different lake types of different genetic origin constructed in this way can be applied to a wide range of small and medium-sized (area less than 100 km²) unstudied and poorly studied lakes in Russia. Provided that the FLake model is sup-

plemented with appropriate program modules, other chemical and biological characteristics of water bodies, such as, for example, oxygen regime, biomass and primary production of algae, water transparency, etc., can also be estimated using the above scheme.

Acknowledgements

The work was supported by the Russian Science Foundation project 24-27-00067 “Methodology for remote assessment of the characteristics of unstudied lakes in permafrost zones using satellite information and mathematical modeling.”

Conflict of interest

The authors declare no competing interest.

References

- Adamenko V.N. 1985. Climate and lakes (Towards an assessment of the present, past and future). Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russian)
- Balatsenko M.I. 2016. Transit-accumulation features of lakes in Yakutia. Cand. Sc. Dissertation, Herzen University, St. Petersburg, Russia. (in Russian)
- CORDEX regional climate model data on single level European Centre for Medium-Range Weather Forecast. 2021. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.bc91edc3?tab=overview> (access date: 05/06/2024)
- Golosov S., Kirillin G.A. 2010. Parameterized model of heat storage by lake sediments. *Environmental Modelling & Software* 25(6): 793-801.
- Gorodnichev R.M., Levina S.N., Ushnickaya L.A. et al. 2020. Morfometricheskie parametry raznotipnyh ozer Severa Yakutii. *Uspekhi sovremennoego estestvoznaniya [Advances in modern natural science]* 1: 18-25. DOI: [10.17513/use.37316](https://doi.org/10.17513/use.37316) (in Russian)
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146: 1999-2049. DOI: [10.1002/qj.3803](https://doi.org/10.1002/qj.3803)
- Kirillin G., Hochschild J., Mironov D. et al. 2011. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage. *Environmental Modelling & Software* 26(5): 683-684.
- Kondratyev S.A. 2007. Formation of external load on reservoirs: modeling problems. St. Petersburg: Nauka. (in Russian)
- Kondratyev S.A., Bovykin I.V. 2003. The influence of possible climate changes on the hydrological regime of the catchment-lake system. *Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and hydrology]* 10: 86-96. (in Russian)
- Meinshausen M. 2011. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change* 109: 213-241. DOI: [10.1007/s10584-011-0156-z](https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z)
- Mironov D., Heise E., Kourzeneva E. et al. 2010. Implementation of the lake parameterization scheme Flake into the numerical weather prediction model COSMO. *Boreal Environment Research* 15: 218-230.
- Mironov D.V. 2008. Parameterization of Lakes in Numerical Weather Prediction. Description of a Lake Model (No. 11). COSMO Technical Report. Germany: German Weather Service, Offenbach am Main.
- Moss R.H. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463: 747-756. DOI: [10.1038/nature08823](https://doi.org/10.1038/nature08823)

Muravejskij S.D. 1960. Essays on the theory and methods of lake morphometry. In: Rivers and Lakes. Moscow, pp. 91-125. (in Russian)

Nakicenovic N., Swart R. 2000. IPCC Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge: University Press.

National Atlas of Russia. Volume 2. 2007. In: Dumnov A.D., Kirsanov A.A., Kiseleva E.A. et al. (Eds.) Moscow: PKO "Kartografiya". (in Russian)

Nestereva M.I. 2011. Spatial features of the structure of different types of lake basins on the territory of Yakutia. Society. Wednesday. Razvitie [Development] 4: 227-230. (in Russian)

Nezhikhovskiy R.A. 1973. Volume of water in rivers, lakes and reservoirs of the Soviet Union. Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta [Proceedings of the State Historical Institute] 203: 239-247. (in Russian)

Pavlov A.V. 1999. Thermal regime of lakes in the plain regions of the North. Kriosfera Zemli [Earth Cryosphere] III(3): 59-70. (in Russian)

Rockel B., Will A., Hense A. 2008. The regional climate model COSMO-CLM (CCLM) (info). Meteorologische Zeitschrift 17: 347-348. DOI: [10.1127/0941-2948/2008/0309](https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0309)

Rogelj J., Meinshausen M., Knutti R. 2012. Global warm-

ing under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates. Nature Climate Change 2: 248-253. DOI: [10.1038/nclimate1385](https://doi.org/10.1038/nclimate1385)

Rumyantsev V.A., Izmajlova A.V., Makarov A.S. 2021. State of the lake fund of the Arctic zone of the Russian Federation. Izvestiya Rossijskoj akademii nauk [Bulletin of the Russian Academy of Sciences] 91(2):115-126. (in Russian)

Samarsky A.A. 1983. Modern applied mathematics and computational experiment. Communist 18: 31-42. (in Russian)

Zdorovenov R., Golosov S., Zverev I. et al. 2020. Arctic climate variability and ice regime of the Lena River delta lakes. E3S Web of Conferences (IV Vinogradov Conference) 163: 04008. DOI: [10.1051/e3sconf/202016304008](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016304008)

Zhirkov I.I. 1983. Morphogenetic classification as the basis for the rational use of protection and reproduction of natural resources of the permafrost zone. In: Issues of rational use and protection of natural resources of different types of lakes in the permafrost zone (on the example of Central Yakutia) Interuniversity collection, Yakutsk, pp. 4-45. (in Russian)

Оценка термических характеристик озер зоны многолетней мерзлоты методом математического моделирования (на примере озер Якутии)

Оригинальная статья

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Кондратьев С.А., Голосов С.Д., Зверев И.С., Расулова А.М.*,
Крылова В.Ю., Ревунова А.В.

Институт озероведения Российской академии наук – СПб ФИЦ РАН, ул. Севастьянова, 9, г. Санкт-Петербург, 196105, Россия

АННОТАЦИЯ. Цель исследования – выявление возможностей математического моделирования при решении задач количественной оценки и прогноза гидротермодинамических характеристик озер различного происхождения в зоне многолетней мерзлоты на основе доступной информации об их морфометрии. Объектом исследования являются 420 морфометрически изученных озер Якутии различного генетического происхождения. Обоснован выбор адекватной гидротермодинамической модели процессов в системе «атмосфера – озеро – донные отложения», а также источников информации об атмосферном воздействии на озера (реанализ и климатический прогноз) для изучаемого региона. Проведены имитационные расчеты по оценке ретроспективной межгодовой и внутригодовой динамики абиотических процессов в воде и донных отложениях озер, расположенных в зоне многолетней мерзлоты различных климатических областей Якутии. Выполнены прогностические расчеты по оценке межгодовой динамики изучаемых процессов в воде и донных отложениях наиболее распространенных термокарстовых озер, расположенных в зонах многолетней мерзлоты. При этом использовались два RCP сценария эволюции антропогенных выбросов парниковых газов в атмосферу в будущем – «лучший» и «худший» с точки зрения воздействия на окружающую среду. Дана оценка перспектив дальнейшего использования методов моделирования при создании системы дистанционного мониторинга неизученных и малоизученных озер арктических областей Российской Федерации.

Ключевые слова: озеро, математическая модель, теплоперенос в воде и донных отложениях, многолетняя мерзлота, реанализ, климатический сценарий

Для цитирования: Кондратьев С.А., Голосов С.Д., Зверев И.С., Расулова А.М., Крылова В.Ю., Ревунова А.В. Оценка термических характеристик озер зоны многолетней мерзлоты методом математического моделирования (на примере озер Якутии) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 6. - С. 1380-1398. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-6-1380

1. Введение

В настоящее время абсолютное большинство озер площадью до 100 км² зоны многолетней мерзлоты России можно отнести к категории неизученных, так как на них не проводятся какие-либо контактные измерения (Румянцев и др., 2021). Причиной этого является их многочисленность и труднодоступность. С развитием технологий появились возможности получать информацию о труднодоступных озерах, не проводя трудоемких и дорогостоящих контактных измерений, дистан-

ционными методами исследования (активными и пассивными). Использование данных дистанционного зондирования даёт возможность определять глубину озера (включая батиметрию), измерять температуру воды, отслеживать образование льда, наблюдать за изменениями береговой линии и площади водоёмов, изучать флору и фауну озёрных экосистем, что крайне важно для оценки состояния экосистемы, и многое другое. Такой подход значительно расширяет возможности исследования озер зоны многолетней мерзлоты, позволяя получить ценные данные для экологического мониторинга.

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: arasulova@limno.ru (А.М. Расулова)

Поступила: 23 июля 2024; **Принята:** 24 октября 2024;
Опубликована online: 25 декабря 2024

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



Однако применение дистанционных методов ограничено многими факторами, основными из которых являются разрешающая способность датчиков, затрудняющая изучение мелкомасштабных объектов и процессов (обычно менее 10–30 м²) и глубина проникновения электромагнитного излучения в водоем, что мешает получению информации о термических процессах в водной толще. Недостаток информации о водной массе многочисленных озер негативно влияет на планирование хозяйственной деятельности в северных регионах, а также на научную обоснованность прогнозов возможных изменений характеристик озер и их донных отложений в условиях климатических изменений.

В настоящее время из 723 тысяч озер Республика Саха (Якутия) информация об их глубине и площади поверхности имеется менее чем для 500, которые считаются морфометрически изученными (Балаценко, 2016). При этом озера республики используются для водоснабжения, водоотведения, рыболовства, рекреации, добычи сапропеля, а также во многих других областях человеческой деятельности, требующих информации о характеристиках их водной массы и донных отложений.

Цель настоящего исследования – выявление возможностей математического моделирования при решении задач количественной оценки и прогноза гидротермодинамических (ГТД) характеристик озер различного происхождения в зоне залегания многолетнемерзлых пород (ММП) на основе доступной информации об их морфометрии. Объектом исследования являются 420 генетически разнотипных озер Якутии, морфометрия которых описана в работе (Балаценко, 2016).

2. Объект исследования

Якутия занимает площадь около 3.1 млн. км². На севере территория омывается морями Лаптевых и Восточно-Сибирским. Формы рельефа подстилающей поверхности разнообразны. Можно выделить две основные области: западно-платформенную и восточно-геосинклиналиную, которые формировались в течение кайнозойской эры под воздействием альпийского горообразования, вековых колебаний земной коры, текучих вод, ледников, термокарстового и других процессов (Нестерева, 2011; Балаценко, 2016). Озера расположены в различных физико-географических и климатических условиях, что отражается на происхождении и строении их котловин, а соответственно и на ГТД процессах в озерах, а также функционировании экосистем. Одной из особенностей Якутии является многолетняя мерзлота. Большая часть территории Якутии (90%), за исключением юго-западной и южной части расположена в зоне сплошной многолетней мерзлоты, мощность которой зависит от климата, рельефа местности, характера почвенного и растительного покрова, состава и строения горных пород, экспозиции склонов и других природных условий. Наибольшая мощность достигает до 1500 м в верховьях реки Марха (левый приток р. Вилюй). Вся север-

ная и частично центральная часть Якутии представляют собой зону сплошных ММП мощностью от 400 м и более. В южной и юго-западной частях Якутии наблюдается прерывистое распространение ММП, мощностью до 60 м.

Климат Якутии резко континентальный, на севере и островах – субарктический и арктический. На большей части Якутии (Центрально-Якутская низменность) зима продолжительная, суровая, малоснежная с антициклональным режимом погоды. Температура января колеблется от -26°C до -68°C. Лето короткое, но тёплое и засушливое, температура июля составляет от 2°C до 38°C. В силу особенностей рельефа и удаленности от моря климат имеет свои особенности в различных частях республики. Так на Восточно-Сибирской платформе наблюдается более мягкий климат. Основные климатические области Якутии приведены на Рис.1.

На Рис. 1 указано расположение центроидов (центров тяжести) указанных областей, расположение которых будет использовано в последующих вычислениях. Координаты центроидов каждой из климатических областей (135.905985° E, 71.075318° N – область 1, 130.522173° E, 66.934360° N – область 2, 124.756209° E, 60.887526° N – область 3) определены с использованием программы QGIS. Каждый центроид представляет собой барицентр слоя климатической области, его координаты – это средние значения координат всех узлов полигона.

Морфометрия озер отражает как специфику развития котловины, так и процессы, протекающие в водной массе и донных отложениях (Адаменко, 1985; Муравейский, 1960; Нежиховский, 1973; Нестерева, 2011; Балаценко, 2016). К числу наиболее распространённых типов озер по морфогенетической классификации (Жирков, 1983) относятся термокарстовые, эрозивно-термокарстовые, водно-эрозийные, ледниковые, тектонические и другие менее распространённые. Основными морфометрическими характеристиками озер являются средняя и максимальная глубины озера, площадь зеркала озера, объем водной массы, длина и изрезанность береговой линии и форма озерной котловины. В табл.1 представлены значения средней глубины озера (Н, м), площади зеркала (А, км²) и объема водной массы озера (V, км³) для различных типов морфометрически изученных озер Якутии (Балаценко, 2016). Как правило, при моделировании озер в качестве входных параметров используется средняя глубина водоемов одного морфогенетического происхождения. Однако, как правило, не для всех озер известны все морфометрические параметры. Взаимная обусловленность генетического происхождения озера и формы его котловины определяет корреляцию между морфометрическими параметрами водоёмов одинакового происхождения. Благодаря этому можно приблизительно оценить недостающие морфометрические характеристики озёр на основе одного или нескольких известных параметров в однородной по генетическому происхождению группе водоёмов. Так, например, в работе (Балаценко, 2016) содержатся

эмпирические геостатистические зависимости, связывающие объем воды в озере с площадью. Такого рода зависимости могут использоваться для количественной оценки и других морфометрических характеристик озер, например – глубины.

Как видно из рассматриваемой выборки наиболее широко распространены на территории Якутии озера **термокарстового** происхождения. Эти озера большей частью невелики по размерам и имеют округло-овальную форму. Их глубины равны 1–3 м и только в отдельных озерах достигают 10–15 м. К **водно-эрозионным** относятся пойменные, речные и расположенные в дельтах или в устьях рек озера. Данные озера образуются в результате отделения от реки проток (рукавов) и участков старого русла (стариц), либо при затоплении полыми водами пониженных участков. Озера водно-эрозионного происхождения распространены вдоль рек, для них характерна продолговатая форма и небольшая глубина (0.9–3.6 м) и площадь (0.01–2.39 км²) (Городничев и др., 2020). **Эрозионно-термокарстовые** озера образовались в древних долинах крупных рек, на террасах среднего и верхнего комплексов. Это наиболее крупные озера региона, которые по мере поднятия на более высокие гипсометрические уровни утратили явные признаки эрозионного происхождения, приобрели округлые и округло-удлиненные очертания. Озера **ледникового** происхождения представляют собой следы пребывания и движения ледников четвертичного периода в виде шрамов, бараньих лбов, которые хорошо заметны на скалистых берегах и островах. Берега озер сложены преимущественно из твердокаменных пород, слабо поддающихся эрозии, что является одной из причин слабого процесса осадконакопления. Озера **тектонического** происхождения отличаются наибольшей глубиной и прозрачностью, большинство из них проточные. Они образуются в местах разломов и сдвигов земной коры. Как правило, это глубокие узкие водоемы с крутыми отвесными и каменистыми берегами, расположенные в глубоких сквозных ущельях (Балаценко, 2016).

3. Материалы и методы

Одним из основных предназначений математического моделирования природных процессов является проведение имитационных и прогностических расчетов, позволяющих осуществить выход за рамки возможного натурного эксперимента

Таблица 1. Средние значения основных морфометрических характеристик озер Якутии с различным генетическим типом происхождения (Балаценко, 2016)

Типы котловин	Кол-во озер	Н, м	А, км ²	V, км ³	V = f(A)
Термокарстовые	231	1.4	0.8	0.001	V = 0.0024A ^{1.14}
Эрозионно-термокарстовые	95	1.9	3.0	0.011	V = 0.0012A ^{1.06}
Водно-эрозионные	90	1.1	0.28	0.0004	V = 0.0036A ^{1.2}
Тектонические	8	34.2	36.3	1.64	V = 0.085A ^{3.2}
Ледниковые	17	4.3	35.5	0.15	V = 0.085A ^{3.2}

(Самарский, 1983; Кондратьев, 2007). Для достижения поставленной цели, то есть для выявления возможностей моделирования при оценке ГТД характеристик озер различного происхождения в условиях залегания ММП, а также их возможных изменений в результате климатических воздействий решались следующие задачи:

- Выбор адекватной модели ГТД процессов в системе «атмосфера – озеро – донные отложения», а также источников информации об атмосферном воздействии на озера (реанализ, климатический прогноз) для изучаемого региона.
- Проведение имитационных расчетов по оценке ретроспективной межгодовой и внутригодовой динамики ГТД процессов в воде и донных отложениях озер, расположенных в зоне многолетней мерзлоты различных климатических областей Якутии. Расчеты выполнялись для гипотетических озер со средними характеристиками из Таблицы 1, расположенных в точках с координатами центроидов климатических областей.
- Проведение прогностических расчетов по оценке межгодовой и внутригодовой динамики ГТД процессов в воде и донных отложениях наиболее распространенных термокарстовых озер, расположенных в зонах залегания ММП различных климатических областей Якутии. Расчеты выполнялись для гипотетических озер со средними характеристиками (Таблица 1), расположенных в точках с координатами центроидов климатических областей (Рис.1), и с использованием различных сценариев изменения климата в регионе.
- Оценка перспектив дальнейшего использования методов моделирования в создании системы дистанционного мониторинга неизученных и малоизученных озер арктических областей Российской Федерации.

Выбор модели ГТД процессов в системе «атмосфера – озеро – донные отложения», а также источников информации об атмосферном воздействии на озера. Рассматриваемые в настоящей работе озера Якутии, расположенные в зоне залегания многолетнемерзлых пород, обладают одной важной особенностью – в них практически всегда присутствуют горизонтальная однородность поля температуры и преобладание вертикальной измен-

чивости термических характеристик водной массы над горизонтальной (Павлов, 1999). При моделировании термического режима водоемов этого класса зачастую достаточно использовать простые одномерные модели, основанные на интегрировании уравнения вертикальной диффузии тепла и различных способах представления вертикального распределения температуры. Такие модели, как правило, основаны на основополагающих физических законах, не требуют задания коэффициентов вертикального турбулентного обмена, просты в реализации и удобны для проведения численных экспериментов. Одной из таких моделей является Flake (Mironov, 2008).

Гидротермодинамическая модель озера FLake¹ является составной частью предложенной методики и разработана совместными усилиями сотрудников Института озероведения РАН, Института водных проблем Севера РАН, Института водной экологии и внутреннего рыбоводства Германии (IGB) и Службы погоды Германии (DWD) (Mironov, 2008; Mironov et al., 2010; Golosov and Kirillin, 2010; Kirillin et al., 2011). Модель представляет собой универсальную параметризованную одномерную математическую модель ГТД процессов в озере, в которой реализованы результаты исследований, полученные в ходе многолетних натурных и лабораторных исследований, выполненных на Лимнологической станции Института озероведения РАН, а также последние мировые достижения в области физической лимнологии. Для успешного использования модели объект моделирования должен удовлетворять следующим основным требованиям:

- протяженность не должна быть настолько велика, чтобы породить значительные климатические различия между отдельными участками акватории, и не настолько мала, чтобы вторичная ветровая циркуляция играла очень существенную роль;
- дно можно аппроксимировать горизонтальной плоскостью;
- адвективные процессы не должны вносить существенного вклада в турбулентное перемешивание.

В настоящее время FLake служит базовым инструментом для разработки моделей функционирования водных экосистем и формирования качества воды в природных и искусственных водоемах, используется как учебное пособие при подготовке специалистов экологов и гидрометеорологов как в нашей стране, так и за рубежом. Продукт синтеза модели озера FLake и приповерхностных метеорологических данных реанализа получил название FLake-Global (Kirillin et al., 2011). Отмечается, что FLake-Global позволяет практически мгновенно оценить сезонный цикл температуры и условий перемешивания в любом мелководном пресновод

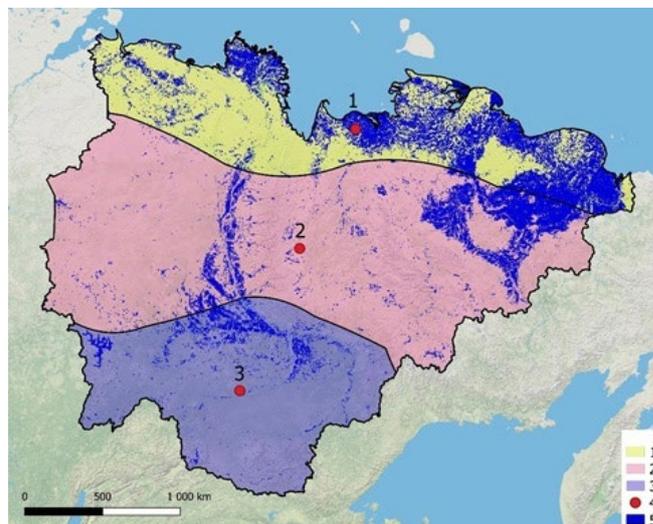


Рис.1. Климатические области на территории Республика Саха: 1 – климат арктических пустынь и тундр, 2 – умеренный континентальный климат с достаточным увлажнением, 3 – климат тайги с устойчивым увлажнением (Национальный атлас..., 2007), 4 – центры климатических областей, 5 – озера

ном озере по всему миру. В качестве метода учета влияния озер на формирование локальных климатических условий модель FLake широко внедрена в практику численного прогноза погоды в метеорологических организациях разных стран и Международного Европейского Центра среднесрочных прогнозов погоды (Mironov, 2008). Европейская прогностическая система COSMO², используемая и в нашей стране для составления прогнозов погоды Росгидрометом на всей территории РФ, также включает FLake в качестве средства оценки влияния пресноводных озер на локальный климат по всему миру. Из этого следует, что модель априори может использоваться на неизученных малых и средних водоемах нашей страны.

Кроме того, в предшествующих исследованиях авторов, выполненных совместно с коллегами из Института водных проблем Севера КарНЦ РАН и Санкт-Петербургского государственного университета (Zdorovenov et al., 2020), представлены результаты верификации модели FLake на озерах острова Самойловский, находящегося в южной части дельты реки Лены. На острове расположено несколько озер преимущественно термокарстового происхождения. Для верификации модели использовались результаты измерений толщины льда озер, придонных и поверхностных температур четырех озер в апреле 2013 года, проведенных группой специалистов из Института полярных и морских исследований имени Альфреда Вегенера (AWI, г. Потсдам, Германия) в рамках экспедиции «Лена» (Zdorovenov et al., 2020).

Данные метеорологического реанализа использовались для задания атмосферного воздействия («форсинга») на озера. Реанализ объединяет данные детерминированного моделирования

¹ ГТД модель Flake <https://www.lakemodel.net> (дата обращения 15.03.2024) (Mironov, 2008).

² Прогностическая система COSMO, Росгидромет. <https://www.meteorf.gov.ru/product/cosmo/> (дата обращения 15.03.2024) (Rockel et al., 2008).

с натурными наблюдениями по всему миру в глобально полный и согласованный набор данных. Принцип такого объединения данных основан на ассимиляции данных, используемых в центрах численного прогнозирования погоды, где каждые несколько часов предыдущий прогноз оптимальным образом комбинируется с новыми доступными наблюдениями для получения новой наилучшей оценки состояния атмосферы. При этом реанализ не связан с необходимостью оперативно выпускать метеорологические прогнозы, следовательно, есть больше времени для сбора наблюдений и учета улучшенных версий исходных наблюдений, что благоприятно сказывается на качестве продукта реанализа.

В настоящей работе в качестве входной информации для гидротермодинамического моделирования послужили данные реанализа семейства ERA5. Реанализы ERA5³ содержат ряды восстановленных значений метеорологических параметров для всего земного шара, которые обновляются ежедневно с задержкой около 5 дней. ERA5 – это пятое поколение реанализа для глобального климата и погоды за последние 8 десятилетий. Данные доступны с 1940 года по настоящее время. ERA5 предоставляет почасовые оценки для большого числа параметров атмосферы, океанических волн и поверхности земли. Временной шаг между сроками «наблюдений» составляет 6 часов, пространственное разрешение реанализа – 0.25° по широте и долготе. Выборка необходимых для расчетов данных производится по координатам расчетной точки. Для облегчения работы многих климатических приложений рассчитываются также и среднемесячные значения гидрометеорологических параметров. При моделировании ГТД процессов в труднодоступных регионах данные реанализа заменяют отсутствующую информацию наземных измерений.

Сценарии изменения климата в регионе.

Для оценки последствий возможных климатических изменений в работе были использованы два сценария эволюции антропогенных выбросов парниковых газов в атмосферу в будущем, т.н. RCP-сценарии (Representative Concentration Pathway) – RCP 2.6 и RCP 8.5 – «лучший» и «худший» с точки зрения воздействия на окружающую среду, соответственно (Meinshausen, 2011; Moss, 2010; Nakicenovic and Swart, 2000; Rogelj et al., 2012). Сценарий RCP 2.6 требует, чтобы выбросы диоксида углерода (CO₂) начали неуклонно снижаться и достигли нуля к 2100 г. Выбросы метана (CH₄) должны уменьшиться на половину, при этом уровень выбросов диоксида серы (SO₂) составит примерно 10% от уровня 1980–1990 годов. В сценарии RCP 8.5 выбросы продолжают расти в течение всего 21 века теми же темпами, что и сейчас. Цифры в аббревиатурах сценариев (2.6 и 8.5) указывают на дополнительное количество энергии (Вт/м²), которое будет аккумулировано атмосферой в результате выбросов парниковых газов. Значения метеорологических параметров

(осадков и температуры воздуха), соответствующих реализации сценариев социально-экономической деятельности человека RCP в изучаемом регионе на период до 2100 года, рассчитаны с использованием климатической модели MPI-ESM-MR (Институт Макса Планка, Германия), участвующей в Фазе 5 Проекта взаимного сравнения моделей Всемирной программы исследований климата (WCRP CMIP5) и рекомендованных в Пятом оценочном докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата⁴. Получение необходимых для расчетов данных осуществлялось путем подачи соответствующего запроса, включающего координаты интересующих точек (в нашем случае – координаты центроидов климатических областей), название климатических моделей (MPI-ESM-MR), тип RCP-сценария (RCP 2.6 и RCP 8.5), названия метеорологических переменных и временное разрешение данных на сайте Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (CORDEX..., 2021). Исходную информацию для климатических прогнозов составляют гидрометеорологические параметры (RCP сценарии) за период 2006–2100 гг.

Для проведения имитационных расчетов выполнялась стыковка гидрометеорологической информации реанализа и климатических прогнозов. Адаптации сценариев RCP к ретроспективным данным реанализа проводились с использованием метода корректировки значений климатических параметров, рассчитанных по модели MPI-ESM-MR для периода 2006–2022 гг. в соответствии с данными реанализа за этот же период времени. Метод основан на использовании соотношений, связывающих значения реанализа (аналога измеренных климатических параметров) и рассчитанных по модели общей циркуляции атмосферы (Кондратьев и Бовыкин, 2003).

При наличии необходимой исходной информации модель рассчитывает следующие характеристики выбранного озера:

- теплоперенос между атмосферой, льдом, водой и донными отложениями;
- вертикальный профиль температуры воды, температуру у поверхности и у дна;
- профиль температуры в донных отложениях;
- дату образования ледового покрова, его продолжительность и толщину;
- глубину протаивания донных отложений в озерах зоны вечной мерзлоты.

4. Результаты и их обсуждение

Возможности математического моделирования при решении задач количественной оценки и прогноза возможных изменений ГТД характеристик озер различного происхождения в условиях залегания ММП на основе информации об их морфоме-

³ Сайт ERA5 <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5> (дата обращения 15.03.2024) (Hersbach et al., 2020).

⁴ Ссылка на доклад <https://www.ipcc.ch/sr15/> (дата обращения 15.03.2024).

трии продемонстрированы на примере решения следующих трех задач имитационного моделирования:

- Расчет внутригодовой динамики ГТД характеристик водной массы и донных отложений в различных климатических областях Якутии.
- Расчет внутригодовой динамики ГТД характеристик водной массы и донных отложений в озерах различного происхождения.
- Ретроспективная и прогностическая оценки динамики среднегодовых ГТД характеристик озер за период 1940–2100 гг.

Значения глубин первых трех типов озер (термокарстовых, водно-эрозионных и эрозионно-термокарстовых) близки между собой (Таблица 1). Их различия не оказывает существенного влияния на результаты моделирования. Поэтому в последующих расчетах рассматривались только термокарстовые озера, как преобладающие в рассматриваемой выборке. Моделирование выполнялись для гипотетических озер, расположенных в точках с координатами центроидов климатических областей, со средними значениями морфометрических характеристик, содержащимися в Таблице 1.

Расчет внутригодовой динамики ГТД характеристик водной массы и донных отложений в различных климатических областях. Имитационное ГТД моделирование водной массы и донных отложений проводилось на примере термокарстового озера в климатических областях арктических пустынь и тундр, континентального климата с достаточным увлажнением, а также климата тайги с устойчивым увлажнением (Рис. 1). Воздействие климата в данной задаче на ГТД характеристики водной массы и донных отложений реализовано через гидрометеорологическую информацию реанализа для центроидов указанных климатических областей. Результаты имитационных расчетов, осредненные за период 1940–2022 гг., представлены на Рисунке 2.

Данные Рисунка 2 демонстрируют зональность внутригодового хода средней по глубине температуры воды, толщины льда и потока тепла между водой и донными отложениями в термокарстовом озере трех основных климатических областей Якутии. Наиболее теплыми являются озера области 3 с климатом тайги и устойчивым увлажнением, летние температуры здесь могут достигать 16°C. За ними следуют водоемы области 2 с умеренным континентальным климатом и достаточным увлажнением. Наименьшие температуры водной массы (не более 6–7°C в летний период) характерны для озер области с климатом арктических пустынь и тундр. Результат достаточно предсказуем, учитывая широтное расположение климатических областей. Однако временная динамика температуры воды в озерах, расположенных в регионах залегания ММП, в зимний период существенно отличается от таковой в озерах, где вечная мерзлота отсутствует. В последних период ледостава характеризуется как правило эффектом «подледного прогрева» водной массы за счет перераспределения тепла между

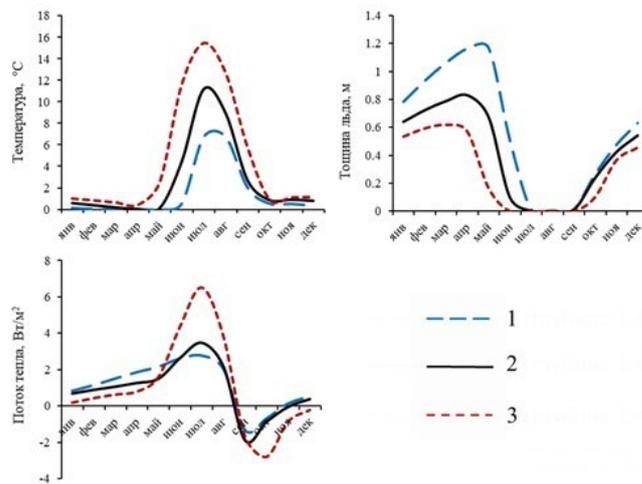


Рис.2. Внутригодовая динамика ГТД характеристик водной массы и донных отложений (средней по глубине температуры воды, толщины льда и потока тепла между водой и донными отложениями), осредненными за период 1940–2022 гг. в термокарстовых озерах областей с: 1 – климатом арктических пустынь и тундр, 2 – умеренным континентальным климатом с достаточным увлажнением, 3 – климатом тайги с устойчивым увлажнением

теплыми донными отложениями и холодной вышележащей водой. В результате в таких озерах в зимний период происходит повышение температуры воды подо льдом. В озерах с ММП данный эффект выражен очень слабо. Он наблюдается только в первые недели ледостава, когда поток тепла отрицателен (направлен из донных отложений в воду), затем поток тепла меняет знак и становится положительным, т.е. направленным из воды в донные отложения. При этом температура водной массы подо льдом уменьшается. Это происходит вследствие того, что, во-первых, сезон летнего прогрева в озерах с ММП непродолжителен – всего около двух месяцев, что не позволяет существенно увеличить теплосодержание донных отложений. Во-вторых, сказывается влияние ММП с отрицательными температурами. Значительная часть тепла в период летнего прогрева расходуется на нагрев и протаивание ледовой фракции ММП. В результате тепло, поступающее из водной массы, расходуется сначала на образование сезонного слоя протаивания, а только затем на непосредственный нагрев самих донных отложений. С образованием ледового покрова то небольшое количества тепла, накопленное в слое протаивания в течение периода летнего прогрева, быстро расходуется на незначительный нагрев придонной воды, после чего слоя протаивания деградирует, а поток тепла меняет направление с отрицательного на положительное.

Сезонная динамика толщины ледового покрова в озерах с ММП отличается от таковой в озерах с отсутствием ММП только в количественных параметрах. Здесь необходимо отметить длительный период ледостава – до 10 месяцев, и большую толщину льда – средние значения за рассматриваемый период составляют до 1.5 м. Качественных различий не наблюдается. Результаты расчета теплообмена через границу «вода – дно» демонстрируют

влияние многолетнемерзлых пород на термический режим озер. В озерах всех климатических областей значительную часть года поток тепла имеет положительные значения, т.е. он направлен из воды в дно. И только в короткий временной промежуток в начале осени, когда начинается период ледостава он становится отрицательным, т.е. направленным из донных отложений в воду.

Расчет внутригодовой динамики ГТД характеристик водной массы и донных отложений в озерах различного происхождения. Имитационное ГТД моделирование водной массы и донных отложений проводилось на для трех типов озер с наиболее отличающимися глубинами – термокарстового, ледникового и тектонического со средними морфометрическими характеристиками (Таблица 1) для области 2 континентального климата с достаточным увлажнением. Воздействие типа озера в данной задаче на ГТД характеристики водной массы и донных отложений реализовано через различия в средних глубинах озер указанных типов. Результаты имитационных расчетов, осредненные за период 1940–2022 гг., представлены на Рисунке 3.

Происхождение озера определяет специфику развития его котловины и такую важную морфометрическую характеристику как средняя глубина, которая является входным параметром модели FLake. Как следует из Таблицы 1 значения глубин разнотипных озер существенно различаются между собой, что сказывается на результатах моделирования. Трехкратное превышение глубины ледниковых озер по сравнению с термокарстовыми приводит к существенным различиям в их термическом режиме в подледный период. В меньшем по объему водной массы термокарстовом озере теплозапас уменьшается быстрее из-за влияния ММП с отрицательными температурами, вследствие чего температура воды приближается к нулевым значениям в конце периода ледостава. В ледниковых озерах температура также уменьшается, но с меньшей скоростью, и к концу ледостава остается положительной. Последнее влияет на стартовые условия начала летнего прогрева озер обоих типов. Термокарстовые начинают прогреваться с практически нулевых значений температуры, тогда как ледниковые – с положительных. Это является одной из причин того, что вода в ледниковых озерах в целом в течение летнего прогрева достигает более высоких температур по сравнению с термокарстовыми. Простая оценка свидетельствует, что теплозапас среднестатистического термокарстового озера к концу зимнего периода (рассчитывается по данным Таблицы 1) более, чем в три раза меньше теплозапаса ледникового озера – $1.6 \cdot 10^9$ и $5 \cdot 10^9$ Дж/м² соответственно. Другой возможной причиной более эффективного прогрева ледниковых озер могут служить условия перемешивания водной массы в озерах обоих типов. В мелких термокарстовых озерах в период летнего прогрева более эффективно происходит ночное конвективное выхолаживание, что в свою очередь влияет на скорость прогрева водной массы. Глубокие текто-

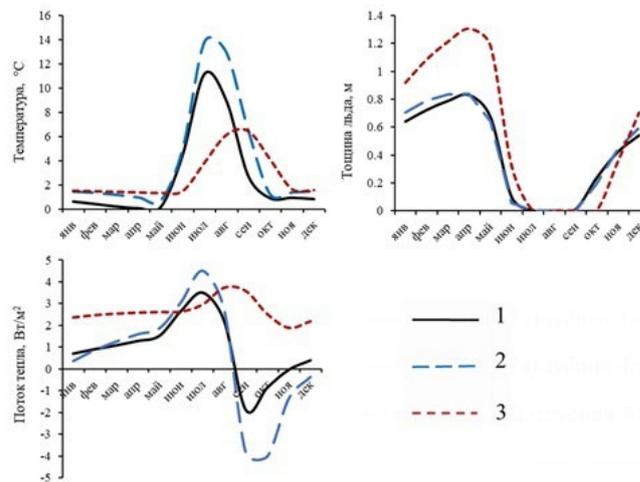


Рис.3. Внутригодовая динамика ГТД характеристик водной массы и донных отложений (температуры воды, толщины льда и потока тепла между водой и донными отложениями), осредненных за период 1940–2022 гг. в термокарстовых – 1, ледниковых – 2 и тектонических – 3 озерах области с умеренным континентальным климатом и достаточным увлажнением

нические озера прогреваются гораздо медленнее по сравнению с предыдущими типами озер. Максимум температуры воды в них приходится на конец августа – первую половину сентября (в термокарстовых и ледниковых озерах максимум приходится на конец июля – начало августа). При этом абсолютные значения температуры воды значительно ниже по сравнению с другими типами озер – всего 6°C, тогда как в термокарстовых и ледниковых – 12–14°C. Из-за большой глубины эффект зимнего влияния ММП в тектонических озерах практически незаметен. Поздний прогрев водной массы в глубоком тектоническом озере приводит к временному сдвигу в сроках начала ледостава – практически на месяц. Поскольку ледостав начинается при существенно отрицательных значениях температуры воздуха, скорость образования льда превышает таковую в термокарстовых и ледниковых озерах. Это приводит к тому, что в целом в тектонических озерах толщина льда больше, чем в термокарстовых и ледниковых.

Теплообмен через границу раздела вода-дно в тектонических озерах также сильно отличается от такового в термокарстовых и ледниковых. В двух последних типах озер характер теплообмена через поверхность донных отложений различается только в количественных параметрах – в ледниковых озерах он немного интенсивнее. В тектонических же озерах из-за отрицательных температур ММП в течение всего года поток тепла направлен из водной массы в донные отложения. При этом не наблюдается заметного снижения температуры в зимний период. Дело в том, что из-за большой глубины процессы перемешивания в тектонических озерах подавлены и теплообмен осуществляется крайне медленным молекулярным механизмом. Тем не менее интенсификация теплообмена через границу раздела вода-дно происходит после достижения температурного максимума с началом осеннего охлаждения, когда

при плотностной конвекции перемешивание проникает в придонные области, за счет чего теплообмен интенсифицируется.

Ретроспективная и прогностическая оценки динамики среднегодовых ГТД характеристик озер за период 1940–2100 гг. Расчеты выполнялись для озера ледникового происхождения, расположенного в климатической области 2 (Рис.1), со средними морфометрическими характеристиками (Таблица 1). Ретроспективная динамика среднегодовой температуры водной массы и средней толщины ледового покрова за период 1940–2022 гг. моделировалась с использованием информации гидрометеорологического реанализа. Далее до 2100 в качестве входной информации в расчетах использовались данные климатических прогнозов (RCP 2.6 и RCP 8.5) для рассматриваемой климатической области. Результаты имитационных расчетов, выполненных для всего периода 1940–2022 гг., представлены на Рисунке 4.

На представленном рисунке наглядно прослеживаются тенденции ретроспективного изменения термических характеристик озер в условиях меняющегося климата с 1940 г. по настоящее время. Средняя температура водной массы озера увеличилась на 0.7°C, при этом толщина ледового покрова уменьшилась на 0.06 м. Далее изменение ГТД характеристик озера существенно зависит от сценариев развития климата. Согласно «худшему» сценарию (RCP 8.5), когда выбросы парниковых газов продолжают расти в течение всего 21 века, возможно дальнейшее увеличение температуры водной массы озера еще на 1.5°C на к 2100 г. Толщина ледового покрова уменьшится на 0.10–0.15 м. «Лучший» климатический сценарий (RCP 2.6), в соответствии с которым выбросы диоксида углерода в атмосферу достигнут нуля к 2100 г., может существенно стабилизировать динамику изменения ГТД характеристик рассмотренного гипотетического озера. Ситуация с толщиной льда разнотипных озер в рассматриваемых климатических областях Якутии полностью соответствует современным представлениям о потеплении в Арктике. Толщина льда уменьшается во всех водоемах, причем образование, нарастание и таяние льда в озерах главным образом является результатом взаимодействия водной массы с атмосферой.

В связи с очевидным влиянием возможного потепления климата на динамику толщины ледового покрова в озерах возникает вопрос о воздействии такого потепления на ММП, которые являются составной частью донных отложений. Дело в том, что водная масса любого водоема, включая озера, является естественным теплоизолятором между атмосферой и донными отложениями. К тому же такой теплоизолятор обладает еще и аномально высокой теплоемкостью. Потепление атмосферы приведет к некоторому увеличению в первую очередь поверхностной температуры в озерах, что скорее всего увеличит вертикальную плотностную стратификацию в них, тем самым усиливая изоляцию придонных слоев от проникновения в них

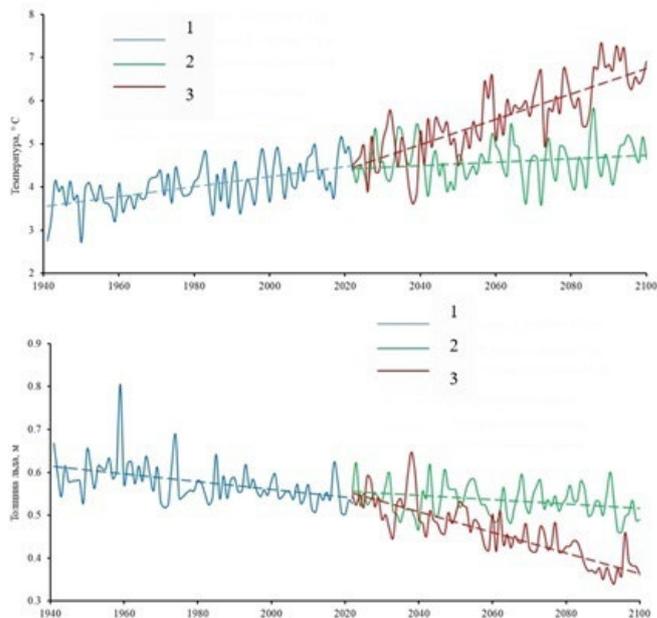


Рис.4. Ретроспективная – 1, и прогностическая – 2 (RCP 2.6) и 3 (RCP 8.5) оценки динамики среднегодовых ГТД характеристик (среднегодовая температура водной массы и средняя толщина ледового покрова) ледниковых озер области 2 (Рис. 1) за период 1940–2100 гг.

атмосферного тепла. Абсолютные значения потока тепла через границу раздела вода-дно крайне невелики – до 10 Вт/м² (Рис. 2, 3), к тому же в течение года он может быть разнонаправленным, т.е. суммарный поток тепла, направленный в донные отложения будет еще меньше. Таким образом можно ожидать, что потепление климата практически не окажет влияния на ММП, находящиеся под озерами.

Разумно предположить, что ситуация с изменением климата в результате деятельности человека будет протекать по некоему промежуточному сценарию. Кроме того, важно помнить, что теоретические аспекты воздействия изменений климата на окружающую среду и водные системы, в частности, находятся в стадии интенсивного развития. Весьма вероятно, что в скором времени будут разработаны новые сценарии эмиссии парниковых газов и климатические модели. Поэтому нужно быть готовым к уточнению прогностических оценок воздействия будущих изменений климата на водные системы.

Представленные результаты имитационного и прогностического моделирования подтверждают широкий спектр возможностей модели FLake при решении задач количественной оценки и прогноза изменений ГТД процессов в озерах различного происхождения, расположенных в различных физико-географических и климатических условиях при недостатке или отсутствии данных натурных наблюдений. Таким образом реализуется одно из основных предназначений моделирования – выход за рамки возможного натурального эксперимента.

5. Заключение

В результате проведения комплекса имитационных и прогностических расчетов показаны

перспективы дальнейшего использования методов моделирования в решении задач оценки ГТД характеристик разнотипных неизученных и малоизученных озер различных климатических областей Якутии. Имея в наличии универсальную и широко апробированную математическую модель ГТД процессов в озерах FLake, которая успешно используется при составлении прогнозов погоды Росгидрометом, можно говорить о реальных предпосылках для разработки системы дистанционного мониторинга озер арктических областей Российской Федерации. Основные этапы создания такой системы сводятся к следующему:

- С использованием средств дистанционного зондирования поверхности Земли дешифрируется интересующий водный объект, находят его географические координаты и площадь водной поверхности.
- На основе геостатистических взаимосвязей между морфометрическими характеристиками однородной группы водных объектов оценивается глубина озера.
- По географическим координатам водного объекта из баз данных метеорологического реанализа и климатического моделирования извлекается метеоинформация требуемого разрешения для последующих ретроспективных и прогностических расчетов.
- Глубина озера и метеопараметры являются входными данными для расчетов тепло- и массообмена в системе “атмосфера – водная масса – донные отложения”, условий перемешивания и вертикального распределения температуры в воде и донных отложениях, а также ледового режима озер по модели FLake. При этом прогностические расчеты позволяют оценить основные тенденции изменения ГТД параметров озер при реализации различных сценариев изменения климата в регионе.

Построенная таким образом схема оценки и прогноза изменений ГТД характеристик разнотипных озер различного генетического происхождения может применяться для широкого спектра малых и средних (площадью менее 100 км²) неизученных и малоизученных водоемов России. При условии дополнения модели FLake соответствующими программными модулями, по приведенной выше схеме могут быть оценены и другие химико-биологические характеристики водоемов, такие как, например, кислородный режим, биомасса и первичная продукция водорослей, прозрачность воды и др.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке проекта Российского научного фонда 24-27-00067 “Методика дистанционной оценки характеристик неизученных озер зон многолетней мерзлоты с использованием спутниковой информации и математического моделирования”.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- CORDEX regional climate model data on single levels/ European Centre for Medium-Range Weather Forecast. 2021. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.bc91edc3?tab=overview> (дата обращения: 05.06.2024)
- Golosov S., Kirillin G.A. 2010. Parameterized model of heat storage by lake sediments. *Environmental Modelling & Software* 25(6): 793-801.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146: 1999-2049. DOI: [10.1002/qj.3803](https://doi.org/10.1002/qj.3803)
- Kirillin G., Hochschild J., Mironov D. et al. 2011. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage. *Environmental Modelling & Software* 26(5): 683-684.
- Meinshausen M. 2011. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change* 109: 213-241. DOI: [10.1007/s10584-011-0156-z](https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z)
- Mironov D., Heise E., Kourzeneva E. et al. 2010. Implementation of the lake parameterization scheme Flake into the numerical weather prediction model COSMO. *Boreal Environment Research* 15: 218-230.
- Mironov D.V. 2008. Parameterization of Lakes in Numerical Weather Prediction. Description of a Lake Model (No. 11). COSMO Technical Report. Germany: German Weather Service, Offenbach am Main.
- Moss R.H. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463: 747-756. DOI: [10.1038/nature08823](https://doi.org/10.1038/nature08823)
- Nakicenovic N., Swart R. 2000. IPCC Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge: University Press.
- Rockel B., Will A., Hense A. 2008. The regional climate model COSMO-CLM (CCLM) (info). *Meteorologische Zeitschrift* 17: 347-348. DOI: [10.1127/0941-2948/2008/0309](https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0309)
- Rogelj J., Meinshausen M., Knutti R. 2012. Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates. *Nature Climate Change* 2: 248-253. DOI: [10.1038/nclimate1385](https://doi.org/10.1038/nclimate1385)
- Zdorovenov R., Golosov S., Zverev I. et al. 2020. Arctic climate variability and ice regime of the Lena River delta lakes. *E3S Web of Conferences (IV Vinogradov Conference)* 163: 04008. DOI: [10.1051/e3sconf/202016304008](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016304008)
- Адаменко В.Н. 1985. Климат и озера (К оценке настоящего, прошлого и будущего). Ленинград: Гидрометеоиздат.
- Балащенко М.И. 2016. Транзитно-аккумуляционные особенностей озер Якутии. Кандидатская диссертация, Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург.
- Городничев Р.М., Левина С.Н., Ушницкая Л.А. и др. 2020. Морфометрические параметры разнотипных озер Севера Якутии. *Успехи современного естествознания* 1: 18-25. DOI: [10.17513/use.37316](https://doi.org/10.17513/use.37316)
- Жирков И.И. 1983. Морфогенетическая классификация как основа рационального использования охраны и воспроизводства природных ресурсов криолитозоны. Вопросы рационального использования и охраны природных ресурсов разнотипных озер криолитозоны (на примере Центральной Якутии). *Межвузовский сборник. Якутск, С. 4-45.*

Кондратьев С.А., Бовыкин И.В. 2003. Влияние возможных климатических изменений на гидрологический режим системы водосбор-озеро. *Метеорология и гидрология* 10: 86-96.

Кондратьев С.А. 2007. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. Санкт-Петербург: Наука.

Муравейский С.Д. 1960. Очерки по теории и методам морфометрии озер. Реки и озера. Москва, С. 91-125

Национальный атлас России. Том 2. 2007. В: Думнов А.Д., Кирсанов А.А., Киселева Е.А. и др. (ред.) Москва: ПКО «Картография».

Нежиховский Р.А. 1973. Объем воды в реках, озерах и водохранилищах Советского Союза. Труды ГГИ 203: 239-247.

Нестерева М.И. 2011. Пространственные особенности строения разнотипных озерных котловин на территории Якутии. *Общество. Среда. Развитие* 4: 227-230.

Павлов А.В. 1999. Термический режим озер равнинных районов Севера. *Криосфера Земли* III(3): 59-70.

Румянцев В.А., Измайлова А.В., Макаров А.С. 2021. Состояние озёрного фонда Арктической зоны Российской Федерации. *Вестник РАН* 91(2): 115-126.

Самарский А.А. 1983. Современная прикладная математика и вычислительный эксперимент. *Коммунист* 18: 31-42.