

Water temperature and dissolved oxygen content in a small lake in Karelia over an annual cycle against the background of regional climate variability

Original Article

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Zdorovenнова G.E.*^{ORCID}, Zdorovenнов R.E.^{ORCID}, Novikova Iu.S.^{ORCID}, Bogdanov S.R.^{ORCID},
Palshin N.I.^{ORCID}, Efremova T.V.^{ORCID}, Smirnov S.I.^{ORCID}

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences, Al. Nevsky Ave., 50, Petrozavodsk, 185030, Russia

ABSTRACT. The article analyzes the results of water temperature and dissolved oxygen content measurements taken at a mooring in a small lake in southern Karelia from October 2022 to October 2024 and compares them with records from the previous 15-year period (2007-2022). The measurements were carried out using RBR Ltd. temperature and dissolved oxygen sensors at 14 depths with 1 min resolution over an annual cycle. The study aims to identify changes in the thermal, oxygen, and the mixing regimes of a small lake in southern Karelia under regional climatic variability. The fall and winter seasons of 2022/23 and 2023/24 were characterized by contrasting weather conditions – the former was warmer than the baseline and the latter was colder and snowier (precipitation in some months exceeded the baseline by 2-3 times). The open water period of 2024 was noticeably warmer than the baseline, and the precipitation amounts in individual months were 2-4 times lower than the baseline. During both cold seasons, anoxic conditions in the bottom layers of the lake lasted for about four months (from mid-January until ice breakup in early May), and during the open water periods of 2023 and 2024 their duration was about three weeks and 1.5 months, respectively. Stratification (the period with a more than 1 °C temperature difference in the water column) in 2024 lasted 119 days, which is 20-60 days more than in previous years of measurements. Due to the calm and warm weather in the summer and early fall, the lake mixing regime in 2024 was dimictic, while in previous years the polymictic regime prevailed (excluding 2022). The biological summer (the period with water temperature above 10 °C) lasted more than 140 days in 2023 and 2024. Based on the 2008-2024 data, we determined the relationship between the duration of the biological summer and the mean monthly air temperatures in May and September, with September temperatures making a greater contribution. The identified changes in the thermal, oxygen and mixing regimes may have an adverse effect on the lake ecosystem, necessitating continuing monitoring.

Keywords: Small lake, water temperature, dissolved oxygen, stratification, oxygen deficiency, mixing regime, biological summer, climate variability

For citation: Zdorovenнова G.E., Zdorovenнов R.E., Novikova Iu.S., Bogdanov S.R., Palshin N.I., Efremova T.V., Smirnov S.I. Water temperature and dissolved oxygen content in a small lake in Karelia over an annual cycle against the background of regional climate variability // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - P. 530-553. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-530

1. Introduction

Climate variability causes changes in thermal, oxygen, ice and lake mixing regimes in many regions of the world. Specifically, an increase in the temperature of the surface layer of lakes, a reduction in the ice period duration, and a deterioration in oxygen conditions have been established (North et al., 2014; Zhang et al., 2015; Magee and Wu, 2017; Woolway and Merchant, 2019; Piccolroaz et al., 2020; Jane et al.,

2021; Piccioni et al., 2021). In recent decades, global warming has caused a rise in summertime surface water temperatures in temperate zone lakes relative to long-term averages (O'Reilly et al., 2015; Pilla et al., 2020; Desgué-Itier et al., 2023). As a result, stratification of the water column in lakes increases (Piccioni et al., 2021; Råman Vinnå et al., 2021; Woolway et al., 2021), affecting multiple aspects of aquatic ecosystem functioning (North et al., 2014; Desgué-Itier et al., 2023). In particular, higher stability of the water column limits

*Corresponding author.

E-mail address: zdorovennova@gmail.com (G.E. Zdorovennova)

Received: July 16, 2025; **Accepted:** July 31, 2025;

Available online: August 31, 2025

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



the vertical transport of substances through the water column and contributes to the deterioration of oxygen conditions (Robertson and Imberger, 1994; Gavrilenko et al., 2018; Jane et al., 2021). Modeling results demonstrate that the observed changes may gain pace in the next several decades (Kirillin, 2010; Shatwell et al., 2019). Changes in the duration of the annual thermal cycle stages and ice phenology can lead to a shift in the seasonal peaks of phyto- and zooplankton development and in fish spawning periods; deteriorating oxygen conditions may cause fish kills; water temperature rise can provoke mass algal blooms. All these changes pose a threat to aquatic ecosystems. Understanding how habitat conditions in lakes are changing due to climate variability is necessary for the conservation and wise use of water resources.

The Republic of Karelia is one of the most lake-rich regions of Russia (more than 60 000 lakes), so the protection and sustainable management of water resources is of high relevance. A manifestation of the regional climate change in southern Karelia is a consistent air temperature rise in all months of the year. According to the Petrozavodsk weather station, the average rate of air temperature increase in the period 1950–2020 was 0.04–0.05 °C/year in December–March and May, 0.03 °C/year in July, September and November, 0.02 °C/year in April and August, 0.01 °C/year in June and October (Palshin et al., 2022). The precipitation regime is also changing: annual precipitation in the period 1991–2017 increased by 12–60 mm versus the baseline of 1961–1990, with an increase occurring in the warm as well as the cold seasons (Filatov et al., 2019). Thus, we are facing a significant risk of alterations in ice phenology and the thermal, oxygen and mixing regimes of lakes under regional climate change.

Human activities, along with climate change, have a significant negative impact on lake ecosystems. Mining, manufacturing, agriculture, tourism – all these economic activities in the catchment and water areas of Karelian lakes affect the sensitive aquatic ecosystems of northern lakes.

Cage farming of rainbow trout *Parasalmo mykiss* is among the economic activities that cause the greatest harm to lake ecosystems. This type of aquaculture has been actively developing in recent years in Karelia, which has become Russia's leader in the production of this valuable fish (Sterligova and Ilmast, 2023). Nutrients, feed residues, fish metabolic waste products are discharged into the water (Michailenko and Sterligova, 2021; Galakhina and Zobkov, 2022), affecting water quality, increasing the frequency of algal blooms, elevating water turbidity, augmenting suspended organic matter content, reducing oxygen content, and altering the trophic status of the lake ecosystems (Kuchko and Savosin, 2020; Savosin et al., 2023; Sterligova et al., 2023; Tekanova et al., 2024). To control these risks, monitoring observations need to be set up in lakes where trout farms are located.

Lake Vendyurskoe is a small lake in southern Karelia used for aquaculture. A trout farm has operated there since 2011. This small lake of glacial origin is typical for Karelia (Terzhevik et al., 2010). It is one of the best-studied small lakes in Karelia. In 1994–

2006, annual integrated hydrophysical studies were conducted there, including deployment of moorings and seasonal spatial measurements of water temperature, currents, solar radiation fluxes, and dissolved oxygen content, with the main focus on the ice-covered period (Petrov et al., 2006; Terzhevik et al., 2009; 2010; Leppäranta et al., 2010). From July 2007 until present, measurements have been carried out through an annual cycle (Palshin et al., 2022; Smirnov et al., 2024; Zdorovenova et al., 2024). The resultant long-term dataset provides information on the features of the ice, thermal, hydrodynamic, and oxygen regimes of this lake. Based on water temperature measurements in 2007–2020, an empirical model of the thermal structure for the ice-free period has been developed (Palshin et al., 2022). In cool windy weather the lake is completely mixed several times during the ice-free period. In hot weather conditions, however, stratification may last more than three months, causing the lake to shift to a dimictic regime (Efremova et al., 2015; Smirnov et al., 2024). Changes have been identified in the ice regime of the lake under regional climate warming – a decrease in ice thickness and a change in its structure due to an increase in the proportion of white ice (Zdorovenova et al., 2025). A deterioration of winter-time oxygen conditions has occurred since the launching of the trout farm (Zdorovenova et al., 2024), but no significant increase in the concentration of chlorophyll “a” in the lake was detected in the first 10 years of the farm's operation (Zdorovenov et al., 2021). The identified changes in the ice, thermal and oxygen regimes of Lake Vendyurskoe under regional climate change and human impact raise the demand for monitoring measurements at this lake.

This paper analyzed how the water temperature and dissolved oxygen content in Lake Vendyurskoe have changed from October 2022 to October 2024 and draws comparisons with data from previous years of measurements (2007–2022). The aim is to identify changes in the thermal and oxygen regimes and the mixing regime of a small lake in southern Karelia under the ongoing change in the regional climate.

2. Materials and methods

Lake Vendyurskoe (62°10'– 62°20' N, 33°10'– 33°20' E) is located in the catchment area of the Suna River, which empties into Lake Onega. It is of glacial origin and has the size, basin morphology and trophic status quite typical for the territory of Karelia (Terzhevik et al., 2010). The surface area of the lake is 10.4 km², the water volume is 0.06 km³ (Lakes..., 2013). Maximum depth is 12.6 m, average depth is 5.3 m. The lake remains ice-covered from mid-November or early December until late April or early May (ice cover persists for 146–192 days depending on year) (Zdorovenov et al., 2013; Zdorovenova et al., 2021). During the ice-covered period and increased stratification in the summer, anoxic conditions develop in the bottom layers of the deep-water basin (Terzhevik et al., 2009; Zdorovenova et al., 2016). Trout farm cages are located near the southern shore of the lake and in a separate bay (Fig. 1).

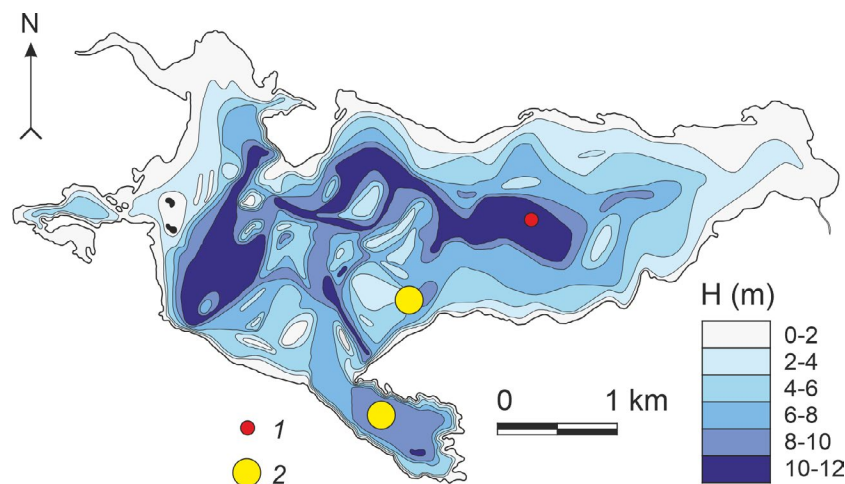


Fig.1. Bathymetric map of Lake Vendyurskoe and the location of the measurement station (1) and trout cages (2). The number of cages in the water area and in the bay is shown schematically; in reality, there are 15-20 in the open lake and 10-15 in the bay. In winter, the cages are moved from the open lake to the bay.

A thermistor chain equipped with temperature and dissolved oxygen sensors RBR Ltd (temperature accuracy 0.001 °C, oxygen range 0-150%, accuracy 1%) has been moored in the deepest central region of the lake since July 2007 until now. The measurement station depth is 11.3 m. The measurement resolution is one minute; the vertical distance between the sensors is 0.25-2.0 m with a smaller distance in the bottom layer. Measurements are carried out year-round. In the early summer and fall, the chain is removed from the lake to collect data, calibrate the sensors and replace the batteries, then returned to its original location. In the period from October 2013 to October 2014, measurements were paused for technical reasons.

This paper analyzes the measurement data from October 2022 to October 2024. During this period, temperature sensors on the chain were located at depths from 1.65 to 7.65 m with one meter spacing, then at depths of 8.15, 9.15, 9.65, 10.35, 10.60, 10.90, and 11.20 m; oxygen sensors - at depths of 1.65, 3.65, 5.65, 7.65, 9.65, and 10.60 m. In June-October 2024, oxygen sensors at depths of 5.65 and 9.65 m were removed from the chain for technical reasons. Based on the data from the chain, the dates of the beginning and duration of stages in the annual thermal cycle, periods of stratification and mixing, periods of oxygen deficiency, and the duration of the biological summer (the period with water temperatures above 10 °C) were determined.

The ice-on date and the bottom water temperature at the end of the winter season were considered as the factors influencing the rate of dissolved oxygen consumption in the lake during the winter. The oxygen content in the water column was calculated for the first C_0 and each subsequent C_t day of the ice-covered period. The C_t/C_0 ratio was then calculated for each day (Zdorovenova et al., 2016). The C_t/C_0 ratio declined during the winter, reflecting the overall oxygen consumption of the lake. The minimum value of this ratio for the 2022/23 and 2023/24 winter seasons was analyzed together with the previously obtained estimates based on 2008-2021 data (Zdorovenova et al., 2021).

Water column stability parameters (Schmidt stability, Lake number, Wedderburn number) were esti-

mated using LakeAnalyzer 2.0 software (Read et al., 2011). A comparative analysis was conducted with data from previous years of measurements on the chain (2007-2022) (Smirnov et al., 2024).

Information on the weather conditions in the study area are provided by the Petrozavodsk weather station (Reliable..., 2025). The weather conditions during the measurement period were compared against the baselines of 1961-1990 and 1991-2020.

3. Results

3.1. Specific weather conditions during the measurement period

The weather conditions in the study area differed significantly between the two consecutive years of measurements. The fall-winter period of 2022/23 was significantly warmer than the baseline, while in 2023/24 it was noticeably colder (Fig. 2, a). The beginning and middle of the summer were colder than the baseline in 2023, but noticeably warmer in 2024. The August and September of both years were abnormally warm, featuring 3.0-6.5 °C above the baseline.

The precipitation regime was characterized by heterogeneity and significant deviations from the baseline in all seasons of the two years (Fig. 2, b). The greatest positive deviations were noted in July, October and November 2023 and March-April 2024. Percentage-wise, precipitation in some months exceeded the baseline by 200-360%. A severe precipitation deficit was observed in May and June of both years, as well as in August and September 2024. The precipitation deficit was the most pronounced in May and August 2024 (three and four times below the baseline, respectively).

In the fall-winter period of both years, the wind impact was significantly higher (average daily wind speed up to 5-8 m/s, gusts up to 17 m/s) than during the open water period (average daily wind speed no more than 3-5 m/s, gusts up to 12 m/s). The summer of 2024 saw a long period of low-wind weather, starting from the second ten-day period of July to the beginning of the third ten-day period of August: the average wind speed in this period was 1.9 m/s.

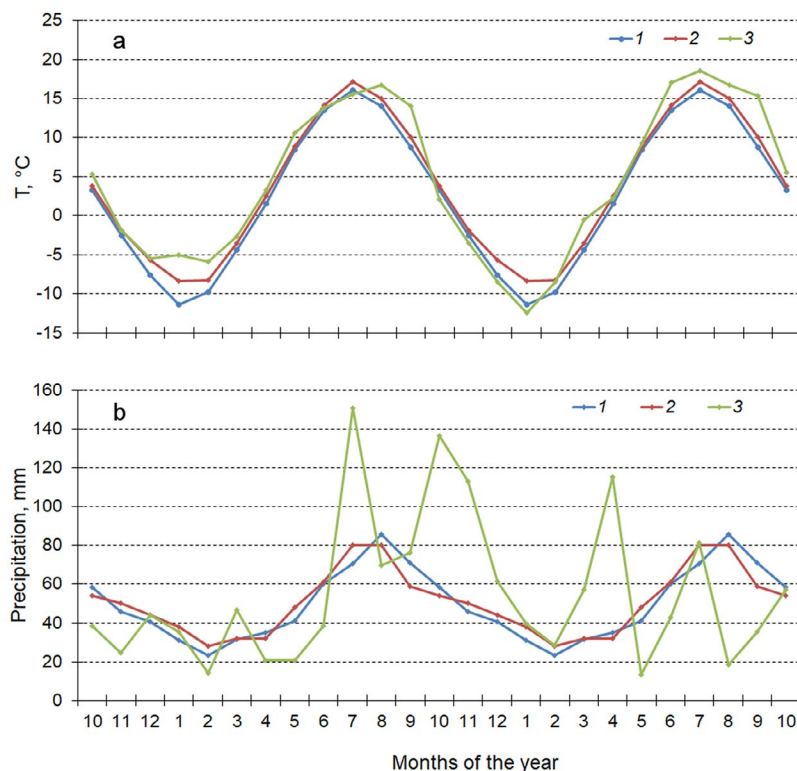


Fig.2. Average monthly air temperature (a) and precipitation (b) in 1961-1990 (1), 1991-2020 (2) and in the period from October 2022 to October 2024 (3) according to data from the Petrozavodsk weather station.

3.2. Water temperature in the fall-winter period

During the pre-ice period of 2022 and 2023, the water column of the lake cooled down in a homothermal manner. The water temperature dropped to 4 °C on November 3, 2022 and October 25, 2023, and further cooling until freeze-up occurred in a completely mixed state of the water column, which is an indicator of a significant wind impact on the lake.

In the first winter, the lake froze up on November 24, 2022, at a water temperature of 0.22 °C in the upper water layer and 0.79 °C in the bottom layer (0.37 °C water-column average), breakup occurred on May 3, 2023, and the duration of the ice-covered period was 160 days (Fig. 3, a). In the second winter, ice formed on November 17, 2023, at a water temperature of 0.38 °C in the upper layer and 0.65 °C in the bottom layer (0.56 °C water-column average). The breakup date was May 8, 2024, after 174 days under ice (Fig. 3, c).

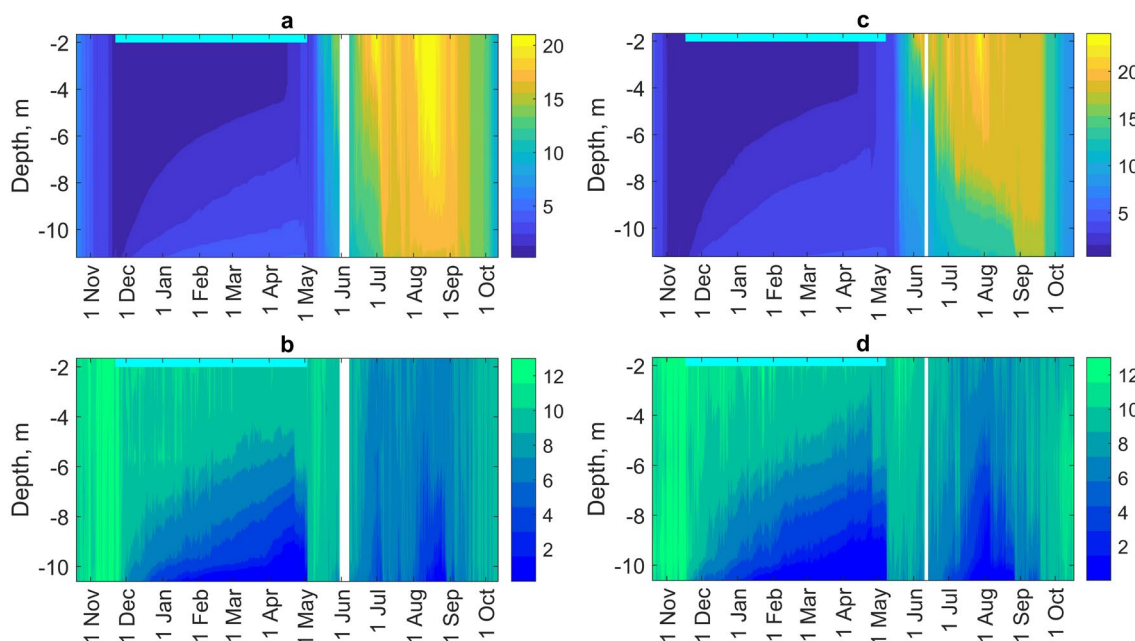


Fig.3. Water temperature, °C (a, c) and dissolved oxygen concentration, mg/l (b, d) in the central deep-water part of Lake Vendyurskoe from October 2022 to October 2023 (a, b) and from October 2023 to October 2024 (c, d). Vertical white stripes on the graphs indicate a pause in measurements. Horizontal blue stripes indicate the ice-covered period.

After ice had formed, the water temperature in the bottom layer increased due to heat exchange between the water mass and sediments, and reached 5.1 °C by the end of the first winter and 5.3 °C by the end of the second one. The radiative under-ice heating of water and convection started on March 24, 2023 and April 8, 2024. One of the presumed reasons for the later onset of convection in the spring 2024 was the weather conditions of the 2023/24 winter season, which induced the formation of a thick layer of white (snowy) ice on lakes of southern Karelia. In the winter 2024, with the total ice thickness on Lake Vendyurskoe being 55 cm, the thickness of black ice was only 20 cm (36%), and the layers of white ice and wet snow between the ice layers were 35 cm thick (64%) (Zdorovenova et al., 2025). In 2023, the total ice thickness was slightly larger (59 cm) and the white ice thickness was slightly smaller (33 cm or 55% of the total ice thickness), and there was no snow. White ice and snow effectively attenuate solar radiation (Petrov et al., 2005). The large thickness of white ice with layers of snow in 2024 hindered the penetration of solar radiation under the ice and delayed the onset of the convection period.

Convective mixing continued in both years until ice breakup, reaching to a depth of 8-9 m. The temperature of the convective layer reached 3.70 °C by the end of the ice-covered period in 2023 and 3.95 °C in 2024. The mixing of the lake water column after ice breakup was completed within a few hours, and the temperature dropped throughout the water column to 2.8 °C in 2023 and to 3.3 °C in 2024.

3.3. Dissolved oxygen in the fall-winter period

In the pre-freeze period in both years, the water column of the lake was well saturated with oxygen (11-12 mg/l) (Fig. 3, b, d). The decrease in the oxygen concentration upon freeze-up occurred the most rapidly in the bottom water layer. By the beginning of the second ten-day period of January in both years, the oxygen content dropped to 2 mg/l (saturation less than 20%) in the meter-thick bottom layer. In the first winter, the anoxic zone at the bottom reached a thickness of 1.5 m by the beginning of April, and in the second winter – already by mid-February. Since spring convection did not reach the bottom in either the first or the second winter, the bottom anoxic zone persisted until the end of the ice-covered period, i.e., for more than 3.5 months in both years. By the end of ice-covered period, the oxygen content at a depth of 5-6 m fell to 6-7 mg/l in the first winter and to 5-6 mg/l in the second. In the upper layer of the lake, the oxygen content decreased slightly during both winters, with occasional fluctuations within 10-12 mg/l. During the spring under-ice convection period, the oxygen content in the convective layer declined as the underlying oxygen-depleted water layers were involved in mixing. After the ice breakup in both years, the lake's water column was completely mixed, and the bottom water layers were saturated with oxygen. The oxygen content in the first days after the breakup was 10-11 mg/l across the water column in both years.

3.4. Water temperature during the open-water period

2023. After the ice breakup on May 3, 2023, the water column of the lake remained mixed until May 10, i.e., for 7 days; during this time, the water temperature increased to 4.5 °C (Fig. 3, a, Fig. 4, a). On May 10, 2023, there formed stratification (more than 1 °C temperature difference across the water column), which persisted, with fluctuating intensity, until the beginning of July. The weather in June and July 2023 was cool (air temperature 0.3-1.6 °C below the 1991-2020 base-line) and windy (wind speed up to 5-7 m/s, gusts up to 14 m/s), causing a weakening of stratification. At the end of June, the water temperature in the upper layer of the lake reached 21.3 °C, after which it dropped to 17.9 °C over the course of a week. Complete mixing of the water column occurred on July 6-7, with the water temperature of the bottom layer rising abruptly by more than 3 °C and reaching 17.1 °C. The weather being cool and windy, the water column remained in a weakly stratified or mixed state throughout July 2023, with the temperature in the water column ranging from 15.6 to 19.3 °C. In August, stratification intensified, and on August 14, the temperature in the upper water layer reached its annual maximum of 21.5 °C. The fall cooling stage began after August 17, when the heat content of the water column rose to the annual maximum. The temperature of the upper layer declined at an average rate of 0.3 °C/day until August 29, when the water column became completely mixed. The annual maximum bottom water temperature of 17.8 °C was reached on September 5, 2023. Due to warm weather conditions in the first half of September 2023, the water column entered a state of weak stratification on September 1-5 and 8-15. Starting from mid-September, the water column was cooling down in a completely mixed state until ice formed. The rate of water temperature decline in October was up to 0.4 °C/day. The duration of the period with more than 1 °C temperature difference across the water column was 94 days, and with more than 2 °C difference – 71 days. The fall cooling period (from August 17 until the water temperature fell below 4 °C on October 25) lasted 79 days. The biological summer in 2023 lasted from May 15 to October 8, i.e., 146 days.

2024. After the ice breakup on May 8, 2024, the water column remained mixed for 8 days. Stratification formed on May 16, fluctuating from stronger during hot weather to weaker during the passage of cyclones, and lasted until the end of the second ten-day period of September (Fig. 3, c, Fig. 4, a). The duration of the period with more than 1 °C temperature difference across the water column in 2024 was 119 days, and with more than 2 °C – 108 days. The temperature of the upper water layer from late May to the end of the second ten-day period of September exceeded 17-18 °C, and the annual maximums of the upper layer temperature (24.7 °C) and the heat content of the water column were attained on July 28. Within a week after that, the water temperature in the upper layer dropped sharply to 19.4 °C, with further decline to 18.3 °C by the end

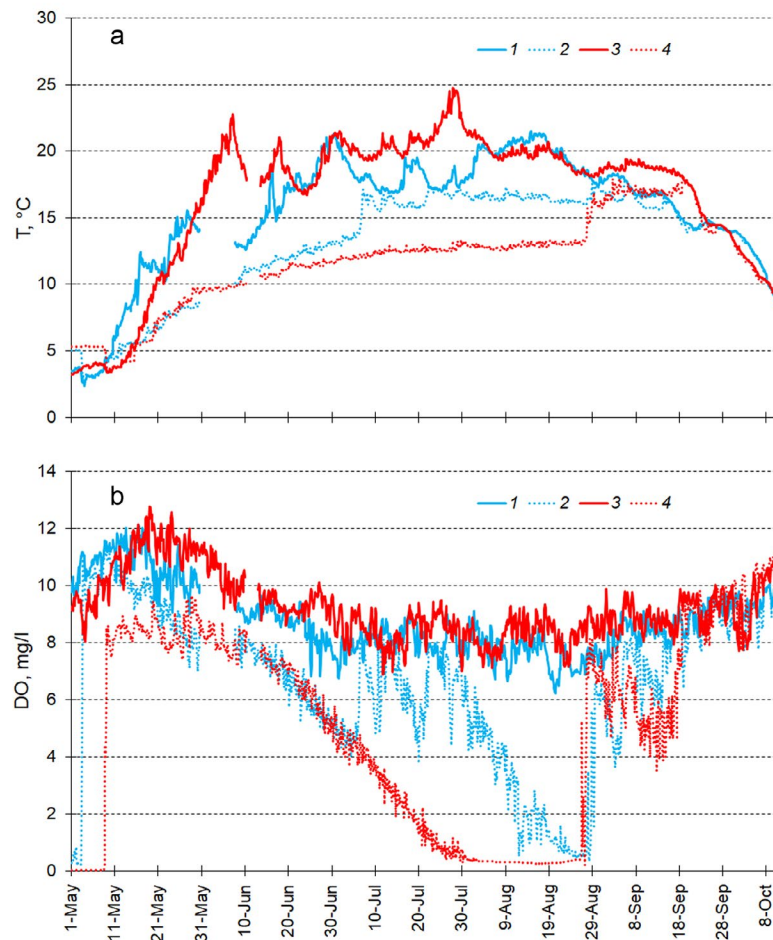


Fig.4. Water temperature (a) and dissolved oxygen concentration (b) in the upper (1, 3) and bottom (2, 4) layers of Lake Vendyurskoe in 2023 (1, 2) and 2024 (3, 4).

of August. However, as the weather in September was abnormally warm (exceeding the 1961-1990 baseline by 6.5 °C), the decrease in the temperature of the upper water layer slowed down, varying within the range of 17.3-19.2 °C until the end of the second ten-day period of September. The temperature of the bottom water layer in the deep-water region rose to 10 °C by the end of May, to 12 °C by mid-July, and to 13 °C by late August. At the end of August, the temperature of the bottom water layer suddenly increased to 16-17 °C and remained at this level until the end of the second ten-day period of September, when the annual maximum of 18.1 °C was reached. Starting September 20, the water column of the lake began to cool down rapidly in a completely mixed state, and the average rate of water temperature decline in the period up to October 17, 2024 (the last day of the analyzed period) was 0.36 °C/day. The biological summer in 2024 lasted from May 19 to October 8, i.e., 142 days.

3.5. Dissolved oxygen during the open-water period

In the first days after ice breakup, the oxygen concentration increased gradually to reach a maximum in mid-May in both years (11-12.5 mg/l in the upper water layer) (Fig. 3, b, d, Fig. 4, b).

2023. In the spring of 2023, the oxygen concentration in the bottom layer declined starting from May 10, going down to 5 mg/l by the end of June.

However, after the water column mixing in early July, the oxygen conditions in the lake improved, with only short-term reductions in oxygen to 4-5 mg/l in the bottom layer observed on July 9-11, 19-21 and 27. The increase in stratification throughout August 2023 triggered a rapid decline in the oxygen concentration in the bottom layer, so that by August 10 it dropped to 2 mg/l. The anoxic zone reached a thickness of 1.5 m by August 20, 2023. After a complete mixing of the lake at the end of August, the oxygen concentration in the bottom layer rose sharply to 8 mg/l. As weak stratification formed in September, oxygen content in the bottom layer declined to 4-6 mg/l. During the fall cooling in September and October 2023, the oxygen concentration increased gradually to 10 mg/l.

2024. During the open water period of 2024, oxygen depletion in the bottom layer of the central basin of the lake began in late May (Fig. 3, d, Fig. 4, b). The thickness of the bottom anoxic zone with an oxygen concentration of less than 2 mg/l reached one meter by mid-July, and 3 m by the beginning of August. The bottom anoxic zone persisted for about 1.5 months until destruction at the end of August (Fig. 3, d, 4, b). In September, the oxygen content in the bottom layer of the central basin was 4-6 mg/l, in October – 8-10 mg/l. In the upper layer, the oxygen content in mid-May reached 12-12.5 mg/l, presumably due to active development of phytoplankton, in June-September it varied within 7-10 mg/l, and in October it increased to 11-12 mg/l.

3.6. Lake water column stability parameters in 2023 and 2024

The stability of the water column of Lake Vendyurskoe during the open-water period differed significantly between 2023 and 2024. In 2023, Schmidt stability (St) was at a maximum of 40-70 J/m² in the third ten-day period of June, and stayed within 35 J/m² at the end of May, June and August (Fig. 5, a). The decrease in St to near-zero values in the first ten days of May, early June, July and starting from mid-September corresponds to periods of complete mixing of the water column. This index was significantly higher in 2024 than in 2023, exceeding 40 J/m² from late May to early August. St values of more than 60-100 J/m² corresponded to periods of strong stratification in June and the last third of July 2024. In August and September, the St values for the two years were comparable.

The characteristic values of the lake number (Ln) in 2023 varied within 2-4 with maxima of up to 6-10, while the values in 2024 reached 10-16 in late July - early August (Fig. 5, b). The Wedderburn number (W) in the period from June to the second ten days of September reached 10-40 in both years, and exceeded 50-70 on some days in 2024 (Fig. 5, c).

4. Discussion

4.1. Ice phenology of Lake Vendyurskoe

The freeze-up and breakup dates, as well as the duration of the ice-covered period on the small lake Vendyurskoe in southern Karelia in the winter seasons

of 2022/23 and 2023/24 fell within the long-term ranges observed in 1994-2021 (Fig. 6).

Despite the warming of the regional climate (increase in the average annual air temperature in 1976-2023 by +0.56-0.61 °C/10 years, from November to April by +0.7 °C/10 years, and from May to October by +0.43 °C/10 years (Efremova et al., 2024; Smirnov et al., 2024; Zdorovennova et al., 2025)), changes in ice phenology on Lake Vendyurskoe over a 30-year period have been statistically insignificant. This may be due to the insufficiently long observation series for this lake, since statistically significant changes in ice phenology have been revealed for several different types of lakes in Karelia, where measurements have been underway for longer periods of time. In particular, it was shown that in 1950-2021 in large lakes of Karelia Onega, Segozero, Topozero, Vygozero, as well as in medium-sized lakes Syamozero, Vodlozero, Vedlozero (area 60-320 km²) and the small Rugozero and Tulmozero (smaller than 15 km²), the ice-on timing has been moving to later dates by 1.3-4.1 days/10 years, and the ice breakup timing to earlier dates by 1.1-2.0 days/10 years. As a result, the duration of the ice-covered period on these lakes is now 18-30 days shorter than the long-term average (Efremova et al., 2024).

Previously, significant correlations between the freeze-up and breakup dates on Lake Vendyurskoe and the air temperature in October-November and April were detected for the period 1994-2020 (Zdorovennova et al., 2022). According to the Petrozavodsk weather station records for the period from 1994 to 2024, the April air temperature remained virtually unchanged

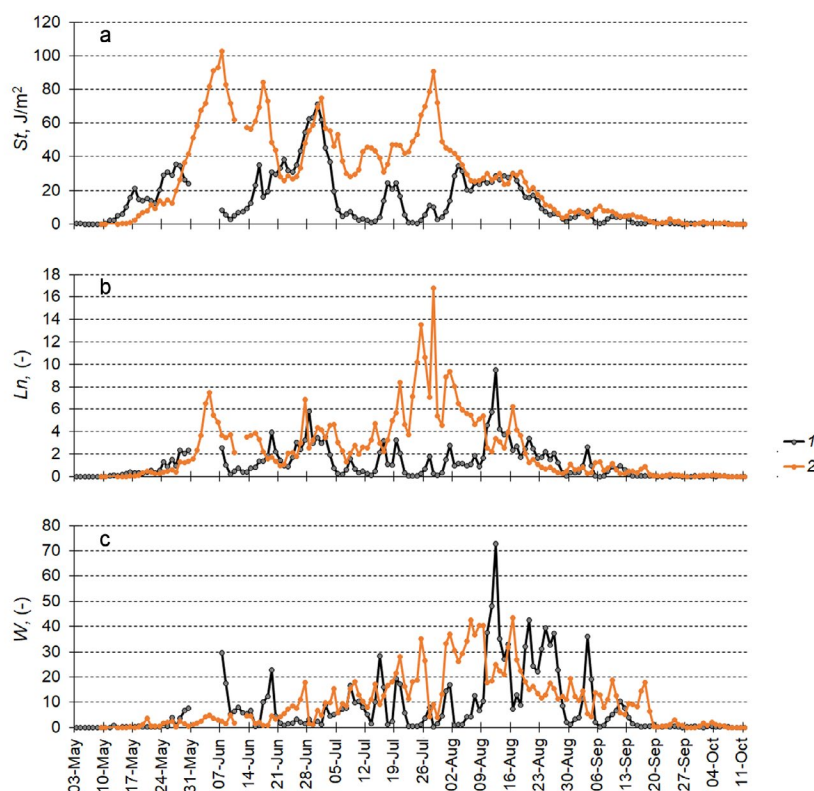


Fig.5. Schmidt stability St (a), lake number Ln (b), and Wedderburn number W (c) during the open-water periods of 2023 (1) and 2024 (2).

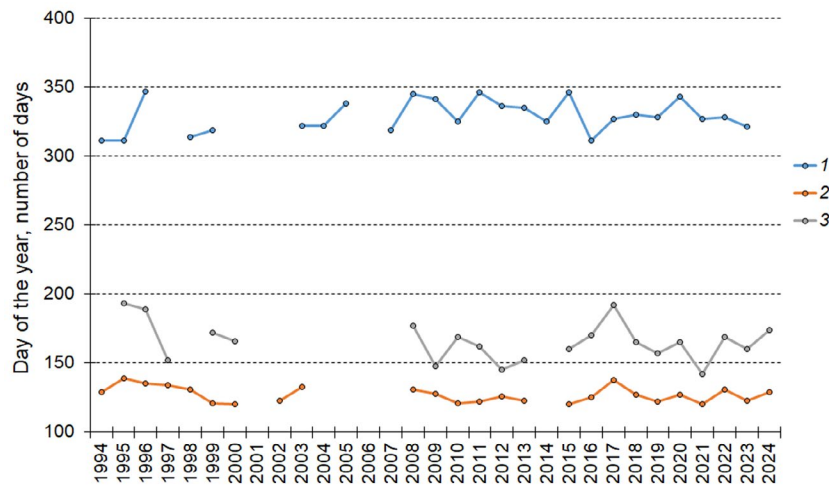


Fig.6. Dates of the beginning (1), end (2) and duration of the ice-covered period (3) at Lake Vendyurskoe in 1994-2024.

(growth rate of $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ years}$), a slight increase was observed for October (growth rate of $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ years}$), and a significant increase for November (growth rate of $1\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ years}$). If the existing trends in air temperature in October, November and April persist, one can expect a reduction in the ice-cover duration on Lake Vendyurskoe, mainly due to a later freeze-up.

4.2. Water column stratification and the mixing regime

Stratification of the water column in Lake Vendyurskoe usually forms in mid- to late May (Smirnov et al., 2024). In summer, however, cyclones often pass over the territory of Karelia (Nazarova, 2021), accompanied by increased wind speed and a $5\text{--}10\text{ }^{\circ}\text{C}$ air temperature reduction for several days. Such weather conditions contribute to convective and wind mixing, which can lead to weakening of stratification and complete mixing of the water column (Mammarella et al., 2018). According to measured data from 2008-2021, the water mass of Lake Vendyurskoe was completely mixed several times during the open-water phase, i.e., the lake mixing regime was polymictic (Gavrilenko et al., 2018; Palshin et al., 2022). Even in the abnormally warm weather conditions of July and August 2010 (Efremova et al., 2015; Smirnov et al., 2024) with air temperatures exceeding the 1961-1990 baseline by $3\text{--}6\text{ }^{\circ}\text{C}$, the stratification formed in May was destroyed in June because of a prolonged cold snap, i.e., the lake mixing regime was not dimictic. In 2022, for the first time during the period of observations at the mooring, the mixing regime of Lake Vendyurskoe was characterized by only two periods of complete mixing of the water column – after ice melting in spring (from 10 to 26 May) and in the fall (from September 1 until ice-on), i.e., the regime was dimictic (Smirnov et al., 2024). Similarly to 2022, the lake mixing regime during the open-water period of 2024 was also dimictic. Stratification was formed on May 16 and was destroyed only in the second ten-day period of September. The reason for this was the fairly warm weather conditions in all months from May to September (the average

monthly air temperature in these months exceeded the 1961-1990 baseline by $0.9\text{--}6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) and a lower wind impact. These factors supported the stability of the water column of Lake Vendyurskoe and prevented its complete mixing. It can be assumed that if the warming in southern Karelia continues, the mixing regime of Lake Vendyurskoe will become increasingly dimictic, which is consistent with the results of model calculations predicting such a change in the mixing regime of lakes in the temperate zone under global warming (Kirillin, 2010). Obviously, such a change in the mixing regime will pose a threat to the lake ecosystem, primarily due to a deterioration of oxygen conditions.

Owing to the warm and calm weather in the open-water period of 2024, the water column of Lake Vendyurskoe exhibited a stronger stability than in the previous years (Fig. 7). The number of days with the lake number $Ln > 1$, Wedderburn number $W > 3$ and > 10 , Schmidt stability $St > 5\text{--}30\text{ J/m}^2$ in 2024 was greater than in the previous years and comparable with the warmest summer seasons (2010, 2013, 2016, and 2022). The period with the temperature gradient in the water column $> 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ in Lake Vendyurskoe in 2024 lasted 119 days, from mid-May to late September, which was much longer than in the previous years (63–98 days) (Fig. 7, c). The period with a $> 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperature difference across the water column in 2024 lasted 108 days versus 38 to 96 days in the previous years.

Over 15 years of water temperature measurements at a mooring in the central part of Lake Vendyurskoe revealed no significant increase in the duration of the biological summer (Fig. 7, c). During the years of measurements, the biological summer lasted from 119 to 146 days, meaning the range of its interannual variability was almost a month. The earliest onset date of this period was May 14, 2016 and the latest was June 6, 2017. The earliest end date of the biological summer was September 24, 2019 and the latest was October 15, 2020. Analysis of the relationship between the biological summer duration and air temperature in May and September (determination coefficients of 0.34 and 0.52, respectively) showed a stronger correlation with the September air temperature.

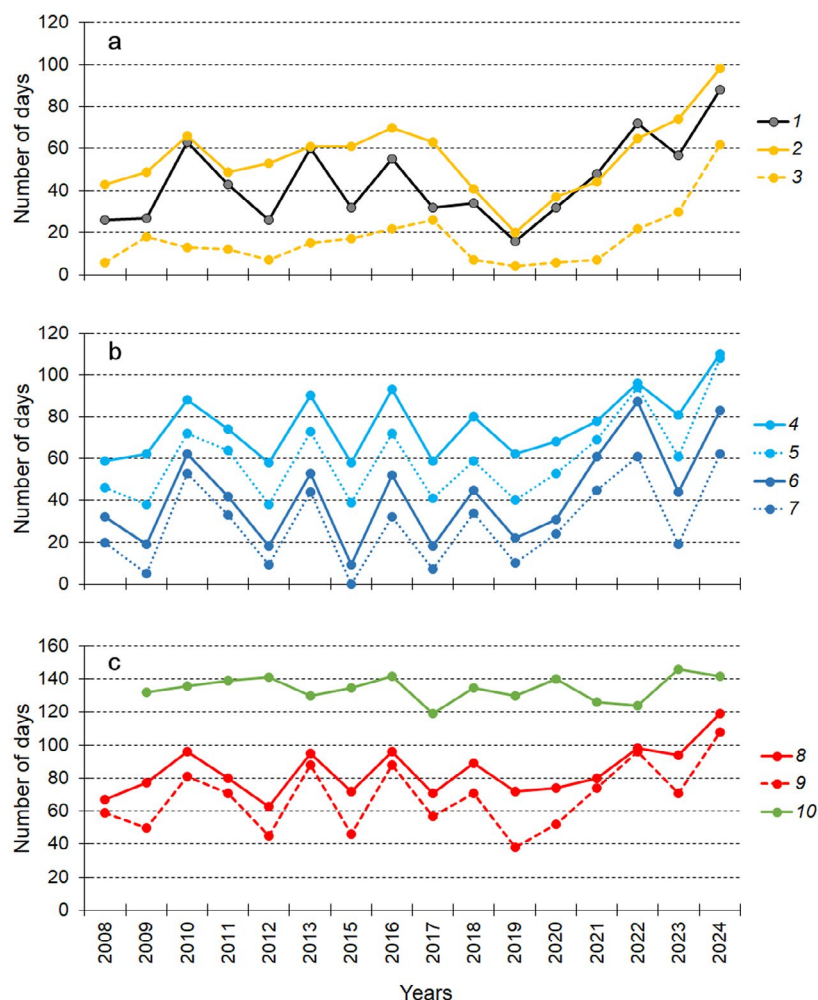


Fig.7. Number of days in different years with characteristic values of the stability parameters of the water column in Lake Vendyurskoe: a – $Ln > 1$ (1), $W > 3$ (2), $W > 10$ (3), b – $St > 5$ (4), $St > 10$ (5), $St > 20$ (6), $St > 30$ (7), c – $dT > 1$ °C (8), $dT > 2$ °C (9), duration of the biological summer, when the temperature of the upper water layer in the lake is above 10 °C (10).

4.3. Oxygen regime

Large-scale studies of temperate lakes have revealed a deterioration in their oxygen regime over the past 60 years in connection with an extension of the summer stratification as a result of global warming (Jane et al., 2021; Jansen et al., 2024). The results of model calculations confirm this finding: the oxygen content in lakes is predicted to decline with a rise in water temperature and an increase in the water column stratification, which hinders the aeration of the bottom layers (Goloso et al., 2012).

Long-term stratification in the summer of 2024 provoked an abnormally long period of hypoxia (oxygen concentration less than 2 mg/l) in the bottom layer of the central basin of Lake Vendyurskoe, which persisted for almost 1.5 months, from July 14 to August 26. There were no such prolonged periods of oxygen deficiency in summer in the previous years, with the exception of 2010 and 2022; bottom hypoxia used to last no more than 2-3 weeks (Efremova et al., 2015; Zdorovenova et al., 2016). In 2010 and 2022, when the weather was hot and windless, bottom hypoxia also lasted from mid-July to late August (Efremova et al., 2015).

In the future, if regional warming continues at the same rate, we can expect the oxygen conditions in Lake Vendyurskoe to deteriorate with an increase in the stratification period.

The oxygen regime of the lake during the ice-covered period in 2022/23 and 2023/24 was characterized by a long – more than four months – existence of a bottom anoxic zone in the central basin of the lake. Data from 2007-2020 shows that the most unfavorable oxygen conditions develop in Lake Vendyurskoe in winters with early ice-on and high bottom water temperatures at the end of the winter (Zdorovenova et al., 2021). The C_t/C_0 values for the 2022/23 and 2023/24 winter seasons were analyzed together with the 2007-2021 data (Fig. 8). The linear correlation of the minimum C_t/C_0 values at the end of the winter with the ice onset date (Fig. 8, a) and the maximum bottom water temperature during the winter (Fig. 8, b) according to the 2007-2024 data is characterized by fairly high values of the determination coefficient (0.36 and 0.53, respectively). If we assume that ice formation on Lake Vendyurskoe will shift to later dates, then wintertime oxygen conditions can be expected to improve.

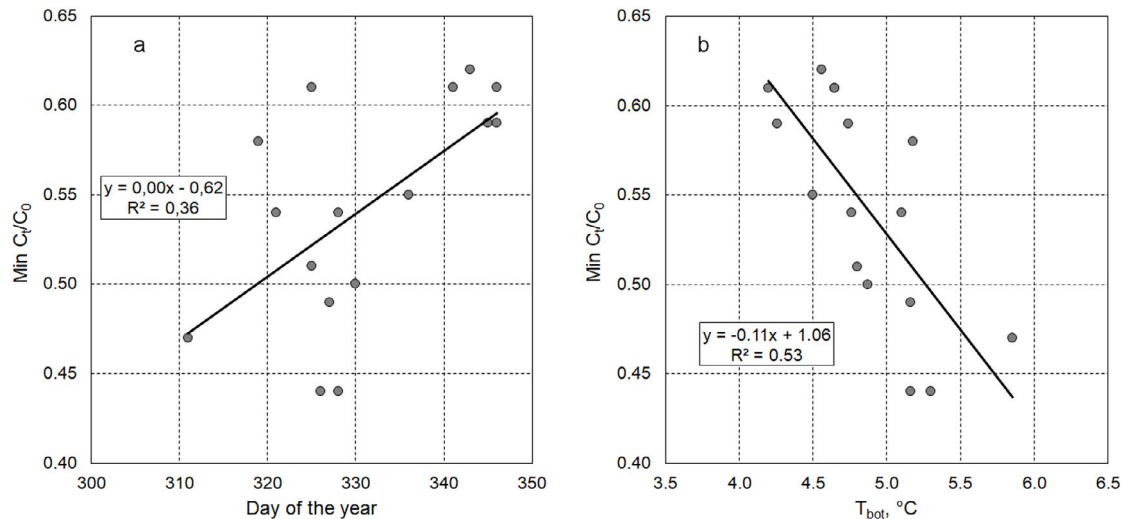


Fig.8. Minimum C_t/C_0 value at the end of the winter in 2007-2024 depending on the ice-on date (a) and the temperature of the bottom water layer at the end of the winter (b). Straight lines are linear trends.

5. Conclusions

Analysis of the dataset from a measurement station in the small Lake Vendyurskoe in southern Karelia revealed the features of the temperature, oxygen, and mixing regimes during the period from October 2022 to October 2024. The weather conditions of the study period caused changes in both the duration of stratification and hypoxia in the summer and in the lake mixing regime in 2024.

During the ice-free period of 2024, as earlier in 2022, the mixing regime of Lake Vendyurskoe was of the dimictic type (with two periods of complete mixing of the water column after ice melting in the spring and in the fall). In other years of measurements, the lake mixing regime was polymictic (several episodes of mixing during the ice-free period). If the current trends of the regional climate change persist (growing temperatures in the summer months), there is a risk that Lake Vendyurskoe will remain stratified for longer periods of time, and its mixing regime will become increasingly dimictic. Combined with the trout farm impact, this may severely affect the oxygen conditions in the future, so it is necessary to continue monitoring measurements of temperature and dissolved oxygen in this lake.

Oxygen depletion in the lake is greater in winters with earlier ice-on and higher bottom water temperatures. Given the dependence of ice-on dates on the lake on the November air temperature, it can be assumed that with continuing warming in the fall period, the onset of the ice-covered period at Lake Vendyurskoe will shift to later dates, and oxygen conditions in the lake will improve in winter.

Acknowledgements

The study was carried out under state assignment to the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences "The role of hydrophysical processes in ecosystems of shallow lakes. Current state and forecast of the development of ecosystems of small lakes in Karelia under anthropogenic impact and climate change" FMEN-2021-0019. The authors are grate-

ful to A.V. Mitrokhov for assistance in conducting field research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Desgué-Itier O., Melo Vieira Soares L., Anneville O. et al. 2023. Past and future climate change effects on the thermal regime and oxygen solubility of four peri-alpine lakes. *Hydrology and Earth System Sciences* 27: 837-859. DOI: [10.5194/hess-27-837-2023](https://doi.org/10.5194/hess-27-837-2023)
- Efremova T.V., Palshin N.I., Kravchenkova T.G. et al. 2024. The Impact of Climate Change on the Thermal and Ice Regime of Lakes in Karelia Based on Long-Term Observations (1950-2021). In: Abstracts of the All-Russian Scientific Conference "Limnology in Russia" Dedicated to the 80th Anniversary of the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences. St. Petersburg, February 12–14, 2024. St. Petersburg: RAS, pp. 160–161. DOI: [10.12731/978-5-907645-54-7](https://doi.org/10.12731/978-5-907645-54-7) (in Russian)
- Efremova T.V., Palshin N.I., Zdorovenova G.E. et al. 2015. The effects of extremely hot summer 2010 on water temperature and oxygen distribution on Karelian lakes. *Russian Meteorology and Hydrology* 40(9): 612-618. DOI: [10.3103/S106837391509006X](https://doi.org/10.3103/S106837391509006X)
- Filatov N., Baklagin V., Efremova T. et al. 2019. Climate change impacts on the watersheds of lakes Onego and Ladoga from remote sensing and in situ data. *Inland Waters* 9(2): 130-141. DOI: [10.1080/20442041.2018.1533355](https://doi.org/10.1080/20442041.2018.1533355)
- Galakhina N.E., Zobkov M.B. 2022. Hydrochemical studies of the trout farming area in Kondopoga Bay of Lake Onego in the winter of 2022. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN [Transactions of the Karelian Research Centre RAS]* 6: 76–87. DOI: [10.17076/lim1599](https://doi.org/10.17076/lim1599) (in Russian)
- Gavrilenko G.G., Zdorovenova G.E., Volkov S.Y. et al. 2018. Water mass stability and its effect on the polymictic lake oxygen regime. *Geopolitics and Ecogeodynamics of regions* 4(14): 57-71. (in Russian)
- Golosov S., Zverev I., Terzhevik A. et al. 2012. Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lake. *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 64(1): 17264. DOI: [10.3402/tellusa.v64i0.17264](https://doi.org/10.3402/tellusa.v64i0.17264)

- Jane S.F., Hansen G.J.A., Kraemer B.M. et al. 2021. Widespread deoxygenation of temperate lakes. *Nature* 594: 66-70. DOI: [10.1038/s41586-021-03550-y](https://doi.org/10.1038/s41586-021-03550-y)
- Jansen J., Simpson G.L., Weyhenmeyer G.A. et al. 2024. Climate-driven deoxygenation of northern lakes. *Nature Climate Change* 14(8): 832-838. DOI: [10.1038/s41558-024-02058-3](https://doi.org/10.1038/s41558-024-02058-3)
- Kirillin G. 2010. Modeling the impact of global warming on water temperature and seasonal mixing regimes in small temperate lakes. *Boreal Environment Research* 15: 279-293.
- Kuchko Ya.A., Savosin E.S. 2020. Assessment of the state of zooplankton and macrozoobenthos communities of the Masloozero ecosystem in the trout farming zone. *Rybovodstvo i rybnoe hozyajstvo [Fish farming and fish industry]* 5(172): 10-20. (in Russian)
- Lakes of Karelia. Handbook. 2013. In: Filatov N.N., Kukharev V.I. (Eds.) Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences. (in Russian)
- Leppäranta M., Terzhevik A., Shirasawa K. 2010. Solar radiation and ice melting in Lake Vendyurskoe, Russian Karelia. *Nordic Hydrology* 41(1): 60-62. DOI: [10.2166/nh.2010.122](https://doi.org/10.2166/nh.2010.122)
- Magee M.R., Wu C.H. 2017. Response of water temperatures and stratification to changing climate in three lakes with different morphometry. *Hydrology and Earth System Sciences* 21: 6253-6274. DOI: [10.5194/hess-21-6253-2017](https://doi.org/10.5194/hess-21-6253-2017)
- Mammarella I., Gavrilenko G., Zdorovenova G. et al. 2018. Effects of similar weather patterns on the thermal stratification, mixing regimes and hypolimnetic oxygen depletion in two boreal lakes with different water transparency. *Boreal Environment Research* 23: 237-247.
- Michailenko V.G., Sterligova O.P. 2021. Some ecological aspects of rainbow trout cage rearing. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN [Transactions of the Karelian Research Centre RAS]* 12: 82-90. DOI: [10.17076/eco1509](https://doi.org/10.17076/eco1509) (in Russian)
- Nazarova L.E. 2021. Climatic conditions in Karelia. In: *Modern studies of northern water bodies: a tutorial*. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, pp. 7-16. (in Russian)
- North R.P., North R.L., Livingstone D.M. et al. 2014. Long-term changes in hypoxia and soluble reactive phosphorus in the hypolimnion of a large temperate lake: consequences of a climate regime shift. *Global Change Biology* 20: 811-823. DOI: [10.1111/gcb.12371](https://doi.org/10.1111/gcb.12371)
- O'Reilly C.M., Sharma S., Gray D.K. et al. 2015. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Geophysical Research Letters* 42: 10773-10781. DOI: [10.1002/2015GL066235](https://doi.org/10.1002/2015GL066235)
- Palshin N.I., Efremova T.V., Bogdanov S.R. et al. 2022. Empirical Model of the Thermal Structure of a Small Polymictic Lake for Open Water Period. *Proceedings of the Russian Geographical Society* 154(2): 61-76. DOI: [10.31857/S0869607122020033](https://doi.org/10.31857/S0869607122020033) (in Russian)
- Petrov M.P., Terzhevik A.Yu., Palshin N.I. et al. 2005. Absorption of solar radiation by snow-and-ice cover of lakes. *Water Resources* 32(5): 496-504.
- Petrov M.P., Terzhevik A.Yu., Zdorovenov R.E. et al. 2006. The thermal structure of a shallow lake in early winter. *Water Resources* 33 (2): 135-143. DOI: [10.1134/S0097807806020035](https://doi.org/10.1134/S0097807806020035)
- Piccioni F., Casenave C., Lemaire B.J. et al. 2021. The thermal response of small and shallow lakes to climate change: new insights from 3D hindcast modelling. *Earth System Dynamics* 12: 439-456. DOI: [10.5194/esd-12-439-2021](https://doi.org/10.5194/esd-12-439-2021)
- Piccolroaz S., Woolway R.I., Merchant C.J. 2020. Global reconstruction of twentieth century lake surface water temperature reveals different warming trends depending on the climatic zone. *Climatic Change* 160: 427-442. DOI: [10.1007/s10584-020-02663-z](https://doi.org/10.1007/s10584-020-02663-z)
- Pilla R.M., Williamson C.E., Adamovich B.V. et al. 2020. Deeper waters are changing less consistently than surface waters in a global analysis of 102 lakes. *Scientific Reports* 10: 20514. DOI: [10.1038/s41598-020-76873-x](https://doi.org/10.1038/s41598-020-76873-x)
- Råman Vinnå L., Medhaug I., Schmid M. et al. 2021. The vulnerability of lakes to climate change along an altitudinal gradient. *Communications Earth and Environment* 2(35):1-10. DOI: [10.1038/s43247-021-00106-w](https://doi.org/10.1038/s43247-021-00106-w)
- Read J.S., Hamilton D.P., Jones I.D. et al. 2011. Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data. *Environmental Modelling & Software* 26: 1325-1336. DOI: [10.1016/j.envsoft.2011.05.006](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.05.006)
- Reliable prognosis. 2025. Website. Rp5.ru URL: <https://rp5.ru/> (access date July 8)
- Robertson D.M., Imberger J. 1994. Lake Number a Quantitative Indicator of Mixing Used to Estimate Changes in Dissolved Oxygen. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie* 79: 159-176. DOI: [10.1002/iroh.19940790202](https://doi.org/10.1002/iroh.19940790202)
- Savosin E.S., Kuchko Ya.A., Savosin D.S. et al. 2023. Hydrobiocenoses of Lake Maloe Yanisjarvi (South Karelia) under conditions of commercial trout farming. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Fisheries* 4: 26-33. DOI: [10.24143/2073-5529-2023-4-26-33](https://doi.org/10.24143/2073-5529-2023-4-26-33) (in Russian)
- Shatwell T., Thiery W., Kirillin G. 2019. Future projections of temperature and mixing regime of European temperate lakes. *Hydrology and Earth System Sciences* 23: 1533-1551. DOI: [10.5194/hess-23-1533-2019](https://doi.org/10.5194/hess-23-1533-2019)
- Smirnov S.I., Zdorovenov R.E., Efremova T.V. et al. 2024. Parameters of Water Column Stability in a Small Polymictic Lake in Years of Different Weather Conditions. *Water Resources* 51(3): 299-313. DOI: [10.1134/S0097807824700817](https://doi.org/10.1134/S0097807824700817)
- Sterligova O.P., Ilmast N.V. 2023. Ichthyological and hydrobiological studies in Karelia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN [Transactions of the Karelian Research Centre RAS]* 3: 113-124. DOI: [10.17076/eco1777](https://doi.org/10.17076/eco1777) (in Russian)
- Sterligova O.P., Savosin E.S., Kuchko Ya.A. et al. 2023. The state of the ecosystem of Lake Hedo (Western Karelia) under conditions of fish farming activities. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Fisheries* 2: 15-23. DOI: [10.24143/2073-5529-2023-2-15-23](https://doi.org/10.24143/2073-5529-2023-2-15-23) (in Russian)
- Tekanova E., Sidelev S., Kalinkina N. et al. 2024. Toxigenic cyanobacteria and microcystins in a large Northern oligotrophic Lake Onego, Russia. *Toxins* 16(11): 457. DOI: [10.3390/toxins16110457](https://doi.org/10.3390/toxins16110457)
- Terzhevik A., Palshin N., Mitrokhov A. et al. 2009. Some features of the thermal and dissolved oxygen structure in boreal, shallow ice-covered Lake Vendyurskoe, Russia. *Aquatic Ecology* 43(3): 617-627. DOI: [10.1007/s10452-009-9288-x](https://doi.org/10.1007/s10452-009-9288-x)
- Terzhevik A.Y., Pal'shin N.I., Zdorovenov R.E. et al. 2010. Hydrophysical aspects of oxygen regime formation in shallow ice-covered lake. *Water Resources* 37(5): 662-673.
- Woolway R.I., Merchant C.J. 2019. Worldwide alteration of lake mixing regimes in response to climate change. *Nature Geosciences* 12: 271-276. DOI: [10.1038/s41561-019-0322-x](https://doi.org/10.1038/s41561-019-0322-x)
- Woolway R.I., Sharma S., Weyhenmeyer G.A. et al. 2021. Phenological shifts in lake stratification under climate change. *Nature Communications* 12: 2318. DOI: [10.1038/s41467-021-22657-4](https://doi.org/10.1038/s41467-021-22657-4)
- Zdorovenova G., Efremova T., Novikova I. et al. 2025. Contrasting Changes in Lake Ice Thickness and Quality Due to Global Warming in the Arctic, Temperate, and Arid Zones and Highlands of Eurasia. *Water* 17(3): 365. DOI: [10.3390/w17030365](https://doi.org/10.3390/w17030365)
- Zdorovenova G., Palshin N., Golosov S. et al. 2021. Dissolved Oxygen in a Shallow Ice-Covered Lake in Winter: Effect of Changes in Light, Thermal and Ice Regimes. *Water* 13(17): 2435. DOI: [10.3390/w13172435](https://doi.org/10.3390/w13172435)

Zdorovennova G., Palshin N., Zdorovennov R. et al. 2016. The oxygen regime of a shallow lake. *Geography, Environment, Sustainability* 9(2): 47-57. DOI: [10.15356/2071-9388.02v09.2016.04](https://doi.org/10.15356/2071-9388.02v09.2016.04)

Zdorovennova G.E., Golosov S.D., Palshin N.I. et al. 2022. Winter thermal and ice regimes of small Karelian lakes against the background of regional climatic variability. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences* 67 (1): 138–155. DOI: [10.21638/spbu07.2022.108](https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.108) (in Russian)

Zdorovennova G.E., Palshin N.I., Zdorovennov R.E. et al. 2024. Oxygen regime of Lake Vendyurskoe in winter in response to trout farm operations. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN [Transactions of the Karelian Research Centre RAS]* 8: 73–83. DOI: [10.17076/eco1988](https://doi.org/10.17076/eco1988) (in Russian)

Zdorovennov R., Palshin N., Zdorovennova G. et al. 2013. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake. *Estonian Journal of Earth Sciences* 61(1): 26-32. DOI: [10.3176/earth.2013.03](https://doi.org/10.3176/earth.2013.03)

Zdorovennov R.E., Efremova T.V., Palshin N.I. et al. 2021. The Role of Thermohydrophysical Processes in the Distribution of Chlorophyll “a” in a Water Column of a Small Mesotrophic Lake. *Proceedings of the Russian Geographical Society* 153(3): 47-62. DOI: [10.31857/S0869607121030083](https://doi.org/10.31857/S0869607121030083)

Zhang Y., Wu Z., Liu M. et al. 2015. Dissolved oxygen stratification and response to thermal structure and long-term climate change in a large and deep subtropical reservoir (Lake Qiandaohu, China). *Water Research* 75: 249-258. DOI: [10.1016/j.watres.2015.02.052](https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.052)

Температура воды и содержание растворенного кислорода в малом озере Карелии в годовом цикле на фоне региональной климатической изменчивости

Оригинальная статья

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Здоровеннова Г.Э.*^{ORCID}, Здоровеннов Р.Э.^{ORCID}, Новикова Ю.С.^{ORCID}, Богданов С.Р.^{ORCID},
Пальшин Н.И.^{ORCID}, Ефремова Т.В.^{ORCID}, Смирнов С.И.^{ORCID}

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра Российской академии наук, пр. А. Невского, 50,
Петрозаводск, 185030, Россия

АННОТАЦИЯ. Проанализированы данные измерений температуры воды и содержания растворенного кислорода на автономной станции в малом озере южной Карелии в период с октября 2022 г. по октябрь 2024 г. и проведено сравнение с данными предыдущего 15-летнего периода (2007-2022). Измерения проводились датчиками температуры и растворенного кислорода фирмы RBR Ltd. на 14 глубинах с дискретностью в одну минуту в годовом цикле. Цель исследования – выявление изменений в термическом и кислородном режимах и режиме перемешивания малого озера южной Карелии на фоне региональной климатической изменчивости. Установлено, что осенне-зимние периоды 2022/23 и 2023/24 гг. характеризовались контрастными погодными условиями – первая зима была теплее нормы, вторая – холоднее и многоснежнее (превышение нормы по осадкам в отдельные месяцы в 2-3 раза). Период открытой воды 2024 г. был заметно теплее нормы, а суммы осадков за отдельные месяцы – в 2-4 раза меньше нормы. В течение обеих зим анаэробные условия в придонных слоях озера существовали около четырех месяцев (с середины января до взлома льда в начале мая), в период открытой воды 2023 и 2024 гг. – около трех недель и 1.5 месяцев соответственно. Стратификация (период с разницей температуры по водному столбу более 1 °C) в 2024 г. продолжалась 119 сут., что на 20-60 сут. больше, чем в предыдущие годы измерений. В 2024 г. на фоне маловетреной погоды и аномально теплых погодных условий лета и начала осени режим перемешивания озера был димиктическим, в предыдущие годы преобладал полимиктический режим (исключение – 2022 г.). «Биологическое» лето (период с температурой воды выше 10 °C) продолжался в 2023 и 2024 гг. более 140 сут. По данным 2008-2024 гг. получена регрессионная зависимость продолжительности «биологического» лета от среднемесячной температуры воздуха в мае и сентябре с большим вкладом температуры сентября. Выявленные изменения термического и кислородного режимов и режима перемешивания могли оказать негативное воздействие на состояние озерной экосистемы, что актуализирует проведение мониторинговых наблюдений.

Ключевые слова: Малое озеро, температура воды, растворенный кислород, стратификация, дефицит кислорода, режим перемешивания, «биологическое» лето, климатическая изменчивость

Для цитирования: Здоровеннова Г.Э., Здоровеннов Р.Э., Новикова Ю.С., Богданов С.Р., Пальшин Н.И., Ефремова Т.В., Смирнов С.И. Температура воды и содержание растворенного кислорода в малом озере Карелии в годовом цикле на фоне региональной климатической изменчивости // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - С. 530-553. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-530

1. Введение

Климатическая изменчивость обуславливает изменения термического, кислородного, ледового режимов и режима перемешивания озер во многих

регионах мира. В частности, установлено повышение температуры воды поверхностного слоя озер, сокращение продолжительности ледостава, ухудшение кислородных условий (North et al., 2014; Zhang et al., 2015; Magee and Wu, 2017; Woolway

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: zdorovennova@gmail.com (Г.Э. Здоровеннова)

Поступила: 16 июля 2025; Принята: 31 июля 2025;

Опубликована online: 31 августа 2025

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



and Merchant, 2019; Piccolroaz et al., 2020; Jane et al., 2021; Piccioni et al., 2021). В последние десятилетия на фоне глобального потепления происходит увеличение температуры воды поверхностного слоя озер умеренной зоны в летний период относительно среднесезонных значений (O'Reilly et al., 2015; Pilla et al., 2020; Desgué-Itier et al., 2023). Вследствие этого стратификация водной толщи озер усиливается (Piccioni et al., 2021; Råman Vinnå et al., 2021; Woolway et al., 2021), что оказывает негативное влияние на многие аспекты функционирования водных экосистем (North et al., 2014; Desgué-Itier et al., 2023). В частности, усиление устойчивости водной толщи озер ограничивает перенос веществ по водному столбу, способствует ухудшению кислородных условий (Robertson and Imberger, 1994; Гавриленко и др., 2018; Jane et al., 2021). Результаты модельных расчетов показывают, что наблюдаемые изменения могут усилиться в следующие несколько десятилетий (Kirillin, 2010; Shatwell et al., 2019). Изменения продолжительности этапов годового термического цикла и ледовой фенологии могут приводить к смещению сезонных пиков развития фито- и зоопланктона, сроков нереста рыб; ухудшение кислородных условий может быть причиной заморов; повышение температуры воды может провоцировать массовое развитие водорослей, все эти изменения представляют опасность для водных экосистем. Понимание того, как меняются условия среды обитания в озерах под влиянием климатической изменчивости, необходимо для сохранения и рационального использования водных ресурсов.

Республика Карелия – один из наиболее озерных регионов нашей страны (более 60 тыс. озер), для которого проблема охраны и рационального использования водных ресурсов стоит наиболее остро. Региональная климатическая изменчивость южной Карелии проявляется в устойчивом росте температуры воздуха во все месяцы года. Согласно данным метеостанции Петрозаводск, за период 1950–2020 гг. средняя скорость роста температуры воздуха в декабре-марте и мае достигала 0.04–0.05°C/год, в июле, сентябре и ноябре – 0.03°C/год, в апреле и августе – 0.02°C/год, в июне и октябре – 0.01°C/год (Пальшин и др., 2022). Изменяется также и режим осадков: за период 1991–2017 выявлено увеличение годовых сумм осадков на 12–60 мм относительно климатической нормы 1961–1990 гг., причем увеличение осадков происходит как в теплую, так и в холодную половину года (Filatov et al., 2019). То есть, на современном этапе есть опасность изменений как ледовой фенологии, так и термического, кислородного режимов озер и режима перемешивания под влиянием региональной климатической изменчивости.

Антропогенная деятельность, наряду с климатической изменчивостью, оказывает весьма существенное негативное воздействие на озерные экосистемы. Добыча полезных ископаемых, промышленность, сельское хозяйство, туризм – все эти виды экономической деятельности на водосборах и акваториях озер Карелии негативно воздействуют

на чувствительные водные экосистемы.

Одним из видов хозяйственной деятельности, наносящим существенный вред озерным экосистемам, является садковое выращивание радужной форели *Parasalmo mykiss*. Этот вид аквакультуры активно развивается в последние годы в Карелии, которая стала лидером России по производству этой ценной рыбы (Стерлигова и Ильмаст, 2023). В результате деятельности форелевых хозяйств в воду поступают биогенные вещества, остатки кормов, продукты жизнедеятельности рыб (Михайленко и Стерлигова, 2021; Галахина и Зобков, 2022), вследствие чего снижается качество воды, учащаются эпизоды ее «цветения», увеличивается количество взвешенного органического вещества в воде и ее мутность, ухудшаются кислородные условия, меняется трофический статус экосистем озер (Кучко и Савосин, 2020; Савосин и др., 2023; Стерлигова и др., 2023; Tekanova et al., 2024). Подобные изменения представляют опасность для чувствительных водных экосистем, что актуализирует мониторинговые наблюдения в озерах, в которых располагаются форелевые хозяйства.

Оз. Вендюрское – одно из малых озер южной Карелии, использующихся в рыболовных целях, где с 2011 г. действует форелевое хозяйство. Это озеро – типичный для территории Карелии малый водоем ледникового происхождения (Тержевик и др., 2010). Озеро является одним из наиболее хорошо изученных малых озер Карелии. В 1994–2006 гг. на этом озере проводились ежегодные комплексные гидрофизические исследования, включающие установку автономных станций и сезонные пространственные измерения температуры воды, течений, потоков солнечной радиации и содержания растворенного кислорода, с наибольшим вниманием к периоду ледостава (Петров и др., 2006; Terzhevik et al., 2009; Тержевик и др., 2010; Leppäranta et al., 2010). Начиная с июля 2007 г. до настоящего времени, измерения проводятся в годовом цикле (Пальшин и др., 2022; Здоровеннова и др., 2024; Смирнов и др., 2024). Накопленный массив многолетних данных позволил установить особенности ледового, термического, гидродинамического, кислородного режимов этого озера. По данным измерений температуры воды в 2007–2020 гг. на автономной станции разработана эмпирическая модель термической структуры для периода открытой воды (Пальшин и др., 2022). Установлено, что в годы с прохладной ветреной погодой озеро полностью перемешивается несколько раз за период открытой воды, но на фоне аномально жаркой погоды продолжительность стратификации может превышать 3 месяца, и режим перемешивания озера становится димиктическим (Ефремова и др., 2015; Смирнов и др., 2024). Выявлены изменения в ледовом режиме озера на фоне потепления регионального климата – уменьшение толщины льда и изменение его структуры за счет увеличения доли белого льда (Zdorovenнова et al., 2025). Установлено ухудшение кислородных условий зимой в период деятельности форелевого хозяйства (Здоровеннова и др., 2024),

однако существенного увеличения концентрации хлорофилла «а» в озере в первые 10 лет деятельности хозяйства не обнаружено (Здоровеннов и др., 2021). Выявленные изменения ледового, термического и кислородного режимов оз. Вендюрское под влиянием изменений регионального климата и антропогенной деятельности актуализируют мониторинговые измерения на этом озере.

В данной работе проанализированы особенности изменения температуры воды и содержания растворенного кислорода в оз. Вендюрское в период с октября 2022 г. по октябрь 2024 г. и проведено сравнение с данными предыдущих лет измерений (2007-2022 гг.). Цель исследования – выявление изменений в термическом и кислородном режимах и режиме перемешивания малого озера южной Карелии на фоне изменений регионального климата.

2. Материалы и методы

Озеро Вендюрское (62°10'– 62°20' с.ш., 33°10'– 33°20' в.д.) располагается на водосборе р. Суны, впадающей в Онежское озеро. Это озеро ледникового происхождения; по размеру, особенностям строения котловины и трофическому статусу оно довольно типично для территории Карелии (Терзевик и др., 2010). Площадь поверхности озера составляет 10.4 км², объем вод – 0.06 км³ (Озера..., 2013). Максимальная глубина – 12.6 м, средняя – 5.3 м. Озеро покрыто льдом в период с середины ноября-начала декабря до конца апреля-начала мая (ледостав продолжается в разные годы 146-192 сут.) (Zdorovennov et al., 2013; Zdorovennova et al., 2021). В период ледостава и летом при усилении стратификации в придонных слоях глубоководной котловины развиваются анаэробные условия (Terzhevik et al., 2009; Zdorovennova et al., 2016). Садки форелевого хозяйства располагаются вблизи южного берега озера и в отчлененном заливе (Рис. 1).

В центре озера в районе максимальных глубин, начиная с июля 2007 г. до настоящего времени, находится автономная станция – коса, оснащенная

датчиками температуры и растворенного кислорода RBR Ltd (точность по температуре 0.001 °C, диапазон по кислороду 0-150%, точность 1%). Глубина станции 11.3 м. Дискретность измерений – одна минута, расстояние между датчиками по вертикали составляет 0.25-2.0 м с меньшим расстоянием в придонном слое. Измерения проводятся в круглогодичном режиме. В начале лета и осенью косу извлекают из озера для снятия данных, калибровки датчиков и замены элементов питания, затем помещают на прежнее место. В период с октября 2013 г. по октябрь 2014 г. измерения не проводились по техническим причинам.

В данной работе проанализированы данные измерений с октября 2022 г. по октябрь 2024 г.; в этот период датчики температуры на косе располагались на глубинах от 1.65 до 7.65 м через метр, далее на глубинах 8.15, 9.15, 9.65, 10.35, 10.60, 10.90, 11.20 м, датчики кислорода – на глубинах 1.65, 3.65, 5.65, 7.65, 9.65, 10.60 м, в июне-октябре 2024 г. датчики кислорода на глубинах 5.65 и 9.65 м были сняты с косы по техническим причинам. По данным косы установлены даты начала и продолжительность этапов годового термического цикла, периоды стратификации и перемешивания, периоды дефицита кислорода, продолжительность «биологического» лета (периода с температурой воды выше 10 °C).

В качестве факторов, влияющих на скорость потребления растворенного кислорода в озере зимой, использовались дата установления льда и температура придонного слоя воды в конце зимнего сезона.

Содержание кислорода в толще воды было рассчитано на первый C_0 и каждый последующий C_t дни ледостава; затем для каждого дня рассчитывалось отношение C_t/C_0 (Zdorovennova et al., 2016). Показатель C_t/C_0 снижался в течение зимы, отражая общее потребление кислорода в озере. Минимальное значение этого показателя для зимних сезонов 2022/23 и 2023/24 гг. проанализировано совместно с полученными ранее оценками по данным 2008-2021 гг. (Zdorovennova et al., 2021).

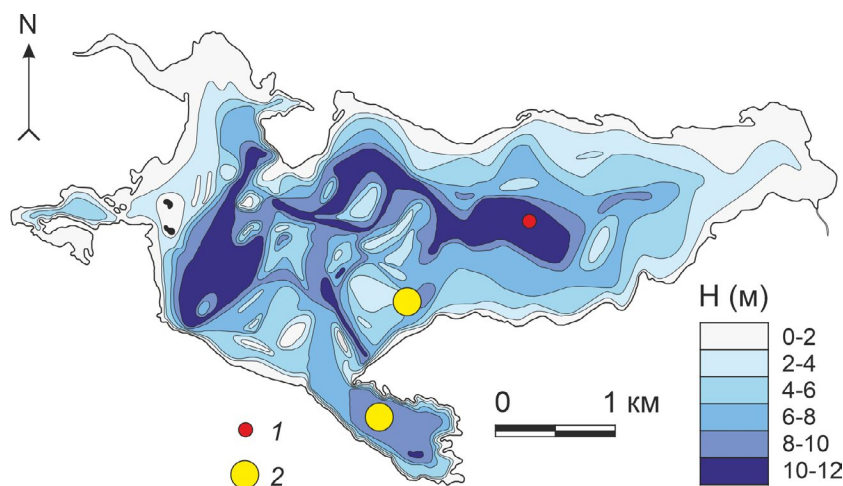


Рис.1. Батиметрическая карта оз. Вендюрское и положение станции измерений (1) и форелевых садков (2). Количество садков на акватории и в заливе показано схематично, в реальности оно достигает 15-20 шт. на акватории и 10-15 шт. в заливе. В зимний период садки с акватории перемещают в залив.

Параметры устойчивости водной толщи (устойчивость Шмидта, озерное число, число Веддерберна) оценены с помощью программы LakeAnalyzer 2.0 (Read et al., 2011). Проведено сравнение с оценками по данным предыдущих лет измерений на косе (2007-2022 гг.) (Смирнов и др., 2024).

Погодные условия района исследований охарактеризованы по данным метеостанции Петрозаводск (Расписание..., 2025). Проведено сравнение погодных условий периода измерений с климатической нормой 1961-1990 и 1991-2020 гг.

3. Результаты

3.1. Особенности погодных условий в период измерений

Погодные условия района исследований в два последовательных года измерений заметно отличались. Осенне-зимний период 2022/23 г. был существенно теплее нормы, 2023/24 г. – заметно холоднее (Рис. 2, а). Начало и середина лета 2023 г. были холоднее нормы, в 2024 г. – заметно теплее. Август и сентябрь обоих лет были аномально теплыми, превышение нормы достигало 3.0-6.5 °C.

Режим осадков характеризовался неоднородностью и существенными отклонениями от нормы во все сезоны двух лет (Рис. 2, б). Наибольшие положительные отклонения отмечены в июле, октябре и ноябре 2023 г. и марте-апреле 2024 г. В процентном выражении в отдельные месяцы осадков выпадало больше нормы на 200-360%. Жесткий дефицит осадков наблюдался в мае и июне обоих лет, а также августе и сентябре 2024 г. В мае и августе 2024 г. дефицит осадков был наиболее сильно выражен (в три и четыре раза меньше нормы соответственно).

В осенне-зимний период обоих лет ветровая нагрузка (среднесуточная скорость ветра до 5-8 м/с, порывы – до 17 м/с) была существенно больше, чем в период открытой воды (среднесуточная скорость ветра не более 3-5 м/с, порывы – до 12 м/с). Летом 2024 г. наблюдался продолжительный период маловетренной погоды со второй декады июля до начала третьей декады августа: средняя скорость ветра за этот период составила 1.9 м/с.

3.2. Температура воды в осенне-зимний период

В предледоставный период 2022 и 2023 гг. водная толща озера охлаждалась в состоянии гомогенности. Температура воды понизилась до 4 °C 3 ноября 2022 г. и 25 октября 2023 г., и дальнейшее охлаждение до установления льда проходило в полностью перемешанном состоянии водной толщи, что является показателем существенного ветрового воздействия на озеро.

В первую зиму ледовый покров установился 24 ноября 2022 г. при температуре воды в верхнем слое озера 0.22 °C, в придонном – 0.79 °C (среднее по столбу 0.37 °C), взлом льда произошел 3 мая 2023 г., продолжительность ледостава составила 160 сут. (Рис. 3, а). Во вторую зиму лед установился 17 ноября 2023 г. при температуре воды в верхнем слое 0.38 °C, в придонном – 0.65 °C (среднее по столбу 0.56 °C), взлом льда произошел 8 мая 2024 г., продолжительность ледостава составила 174 сут. (Рис. 3, в).

После установления льда температура придонного слоя воды повышалась вследствие теплообмена водной массы с донными отложениями,

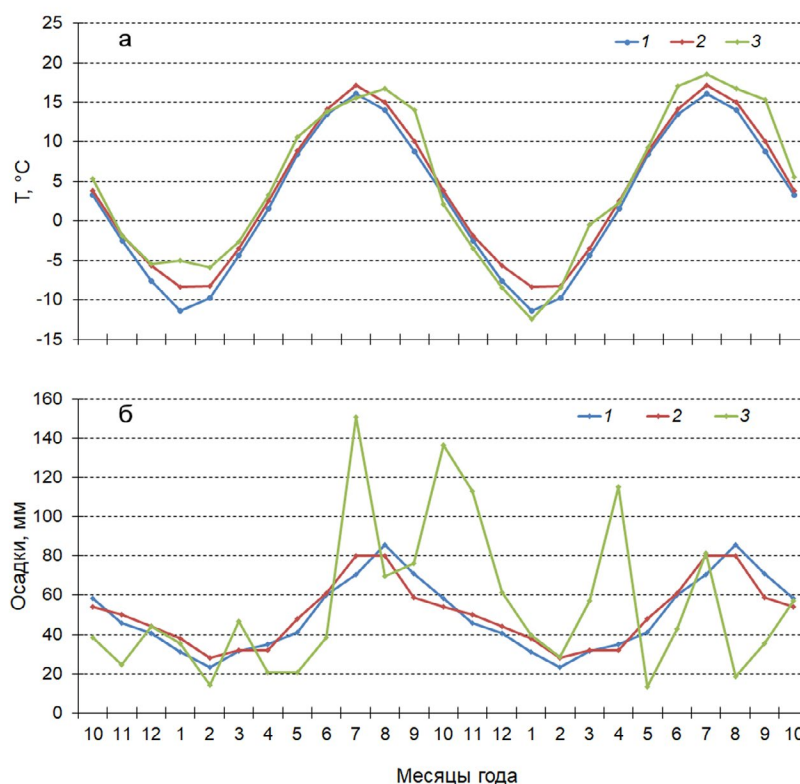


Рис.2. Среднемесячная температура воздуха (а) и осадки (б) в 1961-1990 гг. (1), 1991-2020 гг. (2) и в период с октября 2022 г. по октябрь 2024 г. (3) по данным метеостанции Петрозаводск.

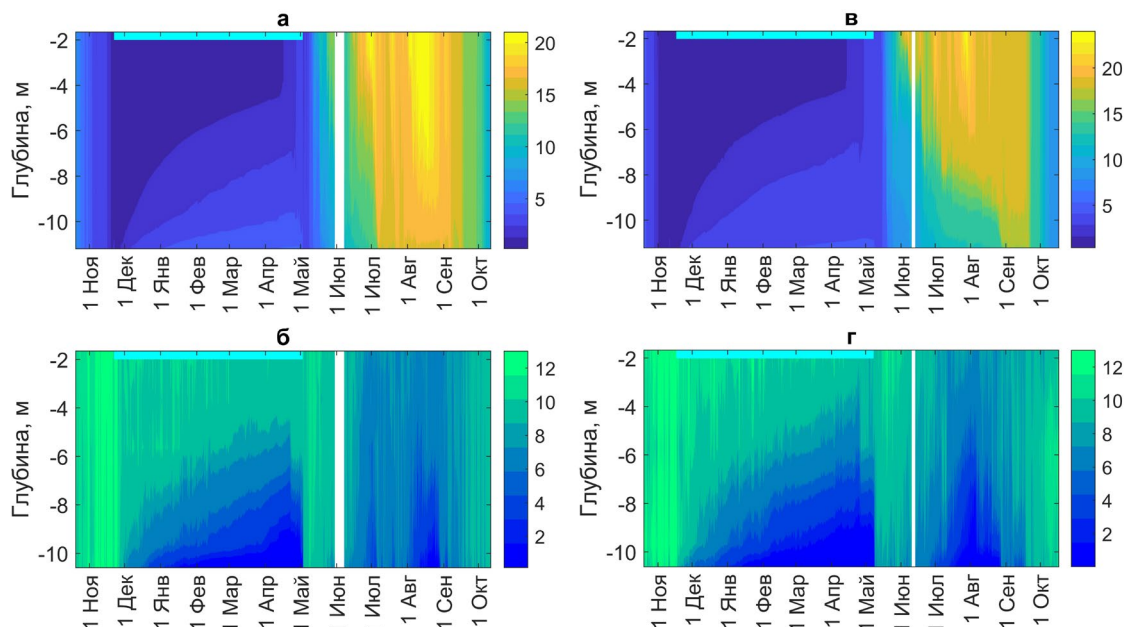


Рис.3. Температура воды, °С (а, в) и концентрация растворенного кислорода, мг/л (б, г) в центральной глубоководной части оз. Вендюрское в период с октября 2022 г. по октябрь 2023 г. (а, б) и с октября 2023 г. по октябрь 2024 г. (в, г). Вертикальные белые полосы на графиках – перерыв в измерениях. Горизонтальные голубые полосы – период ледостава.

и достигла 5.1 °С к концу первой зимы, 5.3 °С – к концу второй. Радиационный подледный нагрев воды и подледная конвекция начались 24 марта 2023 г. и 8 апреля 2024 г. Одной из причин более позднего начала подледной конвекции весной 2024 г. могли быть погодные условия зимнего сезона 2023/24 гг., которые способствовали образованию толстого слоя белого (снежного) льда на озерах южной Карелии. Зимой 2024 г. при общей толщине льда оз. Вендюрское 55 см, толщина кристаллического льда составляла всего 20 см (36%), а слой белого льда и влажного снега между слоями льда – 35 см (64%) (Zdorovenнова et al., 2025). В 2023 г. общая толщина льда была несколько больше (59 см), а толщина белого льда немного меньше (33 см или 55% от общей толщины льда), снег отсутствовал. Белый лед и снег эффективно ослабляют солнечную радиацию (Петров и др., 2005). Большая толщина белого льда с прослойками снега в 2024 г. препятствовала проникновению потока солнечной радиации под лед и сдерживала начало периода конвекции.

Конвекция продолжалась в оба года до взлома льда, охватив водную толщу до глубины 8-9 м. Температура конвективного слоя достигла к концу ледостава 3.70 °С в 2023 г. и 3.95 °С в 2024 г. После взлома льда в течение нескольких часов произошло полное перемешивание водной толщи озера, и температура понизилась по всему водному столбу до 2.8 °С в 2023 г. и 3.3 °С в 2024 г.

3.3. Растворенный кислород в осенне-зимний период

В предледоставный период в оба года водная толща озера была хорошо насыщена кислородом (11-12 мг/л) (Рис. 3, б, г). С началом ледостава уменьшение концентрации кислорода наиболее

быстро происходило в придонном слое воды. К началу второй декады января в оба года содержание кислорода уменьшилось до 2 мг/л (насыщение менее 20%) в метровом придонном слое. В первую зиму придонная анаэробная зона достигла толщины 1.5 м к началу апреля, во вторую – уже к середине февраля. Поскольку весенняя конвекция не достигла дна ни в первую, ни во вторую зиму, придонная анаэробная зона просуществовала до конца ледостава, то есть, более 3.5 месяцев в оба года. К концу ледостава содержание кислорода на глубине 5-6 м понизилось до 6-7 мг/л в первую зиму и до 5-6 мг/л во вторую. В верхнем слое озера на протяжении обеих зим содержание кислорода незначительно уменьшалось, при этом периодически отмечались его колебания в пределах 10-12 мг/л. В период весенней подледной конвекции содержание кислорода в конвективном слое понижалось в связи с тем, что в перемешивание вовлекались нижележащие обедненные кислородом слои воды. После взлома льда в оба года произошло полное перемешивание водной толщи озера, при этом происходило насыщение придонных слоев воды кислородом. Содержание кислорода в первые дни после взлома льда составляло 10-11 мг/л по водному столбу в оба года.

3.4. Температура воды в период открытой воды

2023 г. После взлома льда 3 мая 2023 г. водная толща озера оставалась в перемешанном состоянии до 10 мая, то есть, 7 суток; за это время температура воды повысилась до 4.5 °С (Рис. 3, а, Рис. 4, а). 10 мая 2023 г. установилась стратификация (разница температуры по столбу воды превысила 1 °С), которая, периодически усиливаясь и ослабевая, просуществовала до начала июля. Погодные

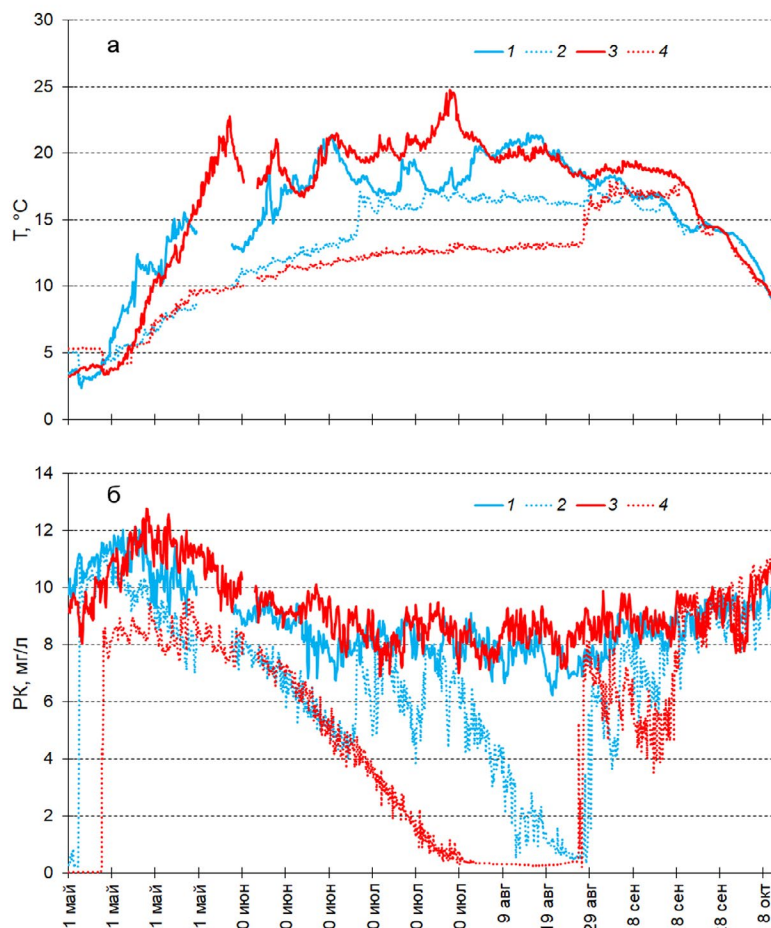


Рис.4. Температура воды (а) и концентрация растворенного кислорода (РК) (б) в верхнем (1, 3) и придонном (2, 4) слоях оз. Вендюрское в 2023 (1, 2) и 2024 гг. (3, 4).

условия в июне и июле 2023 г. были прохладными (температура воздуха ниже нормы 1991-2020 г. на 0.3-1.6 $^\circ\text{C}$) и ветренными (скорость ветра до 5-7 м/с, порывы до 14 м/с), что способствовало ослаблению стратификации. В конце июня температура верхнего слоя озера достигла 21.3 $^\circ\text{C}$, после чего на протяжении недели понизилась до 17.9 $^\circ\text{C}$. Полное перемешивание водной толщи произошло 6-7 июля, при этом температура придонного слоя воды скачкообразно повысилась более чем на 3 $^\circ\text{C}$ и достигла 17.1 $^\circ\text{C}$. Водная толща на фоне прохладной и ветреной погоды на протяжении всего июля 2023 г. оставалась в слабо стратифицированном или перемешанном состоянии при температуре по столбу воды от 15.6 до 19.3 $^\circ\text{C}$. В августе стратификация усилилась, 14 августа был достигнут годовой максимум температуры верхнего слоя воды 21.5 $^\circ\text{C}$. Этап осеннего охлаждения начался после 17 августа, когда был достигнут годовой максимум теплосодержания столба воды. Температура верхнего слоя понижалась со средней скоростью 0.3 $^\circ\text{C}$ /сут. до 29 августа, когда произошло полное перемешивание водной толщи. Годовой максимум температуры воды придонного слоя 17.8 $^\circ\text{C}$ был достигнут 5 сентября 2023 г. На фоне теплых погодных условий первой половины сентября 2023 г. водная толща озера переходила в состояние слабой стратификации 1-5 и 8-15 сентября. С середины сентября

водная толща охлаждалась в полностью перемешанном состоянии до установления льда. Скорость понижения температуры воды в октябре достигала 0.4 $^\circ\text{C}$ /сут. Продолжительность периодов с разницей температуры по столбу воды более 1 $^\circ\text{C}$ составила в 2023 г. 94 сут., более 2 $^\circ\text{C}$ – 71 сут. Период осеннего охлаждения (с 17 августа до перехода температуры воды через 4 $^\circ\text{C}$ в сторону понижения 25 октября) продолжался 79 суток. «Биологическое» лето продолжалось в 2023 г. с 15 мая по 8 октября, то есть, 146 суток.

2024 г. После взлома льда 8 мая 2024 г. водная толща находилась в перемешанном состоянии 8 суток. С 16 мая установилась стратификация, которая, периодически усиливаясь при жаркой погоде и ослабевая при прохождении циклонов, просуществовала до конца второй декады сентября (Рис. 3, в, Рис. 4, а). Продолжительность периодов с разницей температуры по столбу воды более 1 $^\circ\text{C}$ в 2024 г. составила 119 сут., более 2 $^\circ\text{C}$ – 108 сут. Температура верхнего слоя озера с конца мая до конца второй декады сентября превышала 17-18 $^\circ\text{C}$, годовые максимумы температуры верхнего слоя 24.7 $^\circ\text{C}$ и теплосодержания столба воды были достигнуты 28 июля. После этого в течение недели температура верхнего слоя резко понизилась до 19.4 $^\circ\text{C}$, к концу августа – до 18.3 $^\circ\text{C}$. Однако на фоне аномальной для сентября теплой погоды (превыше-

ние нормы 1961-1990 г. на 6.5 °C) понижение температуры воды верхнего слоя замедлилось, и до конца второй декады сентября она изменялась в пределах 17.3-19.2 °C. Температура воды придонного слоя глубоководной котловины к концу мая повысилась до 10 °C, к середине июля – до 12 °C, к концу августа – до 13 °C. В конце августа произошло скачкообразное повышение температуры воды придонного слоя до 16–17 °C, и на этом уровне она оставалась до конца второй декады сентября, когда был достигнут годовой максимум 18.1 °C. С 20 сентября началось быстрое охлаждение водной толщи озера в полностью перемешанном состоянии, и в период до 17 октября 2024 г. (последний день анализируемого периода) средняя скорость понижения температуры воды составляла 0.36 °C/сут. «Биологическое» лето продолжалось в 2024 г. с 19 мая по 8 октября, то есть, 142 сут.

3.5. Растворенный кислород в период открытой воды

В первые дни после взлома льда концентрация кислорода постепенно увеличивалась и достигла максимума в середине мая в оба года (11-12.5 мг/л в верхнем слое озера) (Рис. 3, б, г, Рис. 4, б).

2023 г. Весной 2023 г. в придонном слое концентрация кислорода, начиная с 10 мая, понижалась и к концу июня достигла 5 мг/л. Однако после перемешивания водной толщи в начале июля 2023 г., кислородные условия в озере улучшились, наблюдалось лишь кратковременное снижение кислорода до 4-5 мг/л в придонном слое 9-11, 19-21 и 27 июля. На фоне усиления стратификации на протяжении августа 2023 г. происходило быстрое снижение концентрации кислорода в придонном слое, и к 10 августа она понизилась до 2 мг/л. Анаэробная зона достигла толщины 1.5 м к 20 августа 2023 г. После полного перемешивания озера в конце августа концентрация кислорода в придонном слое резко увеличилась до 8 мг/л. В сентябре при установлении слабой стратификации происходило снижение кислорода в придонном слое до 4-6 мг/л. На этапе осеннего охлаждения в сентябре и октябре 2023 г. наблюдалось постепенное увеличение концентрации кислорода до 10 мг/л.

2024 г. В период открытой воды 2024 г. содержание кислорода в придонном слое центральной котловины озера началось с конца мая (Рис. 3, г, Рис. 4, б), и к середине июля толщина придонной зоны с концентрацией кислорода меньше 2 мг/л достигла одного метра, а к началу августа – 3 м. Придонная анаэробная зона существовала около 1.5 месяцев и была разрушена в конце августа (Рис. 3, г, 4, б). В сентябре содержание кислорода в придонном слое центральной котловины составляло 4-6 мг/л, в октябре – 8-10 мг/л.

В верхнем слое содержание кислорода в середине мая достигало 12-12.5 мг/л, предположительно, на фоне активного развития фитопланктона, в июне-сентябре – изменялось в пределах 7-10 мг/л, в октябре – повысилось до 11-12 мг/л.

3.6. Параметры устойчивости водной толщи озера в 2023 и 2024 гг.

Устойчивость водной толщи оз. Вендюрское в периоды открытой воды 2023 и 2024 гг. существенно отличалась. В 2023 г. максимальные значения устойчивости Шмидта St достигали 40-70 Дж/м² в третью декаду июня, и не превышали 35 Дж/м² в конце мая, июне и августе (Рис. 5, а). Уменьшение St до близких к нулю значений в первую декаду мая, в начале июня, июле и с середины сентября соответствует периодам полного перемешивания водной толщи. В 2024 г. значения St были существенно больше, чем в 2023 г., превышая 40 Дж/м² с конца мая до начала августа. Значения St более 60-100 Дж/м² соответствовали моментам обострения стратификации в июне и последнюю декаду июля 2024 г. В августе и сентябре значения St двух лет были соизмеримы.

Характерные значения озерного числа L_n в 2023 г. изменялись в пределах 2-4 с максимумами до 6-10, в 2024 г. – в конце июля-начале августа достигали 10-16 (Рис. 5, б).

Число Веддерберна в оба года с июня до второй декады сентября достигало 10-40, некоторые дни 2024 г. превышало 50-70 (Рис. 5, в).

4. Обсуждение

4.1. Ледовая фенология оз. Вендюрское

Даты установления и взлома льда, как и продолжительность ледостава на малом озере Вендюрское в южной Карелии в зимние сезоны 2022/23 и 2023/24 гг. попали в диапазоны многолетних значений 1994-2021 гг. (Рис. 6).

Несмотря на потепление регионального климата (рост среднегодовой температуры воздуха в 1976-2023 гг. на +0.56-0.61 °C за 10 лет, средней температуры с ноября по апрель на +0.7 °C за 10 лет, с мая по октябрь на +0.43 °C за 10 лет (Ефремова и др., 2024; Смирнов и др., 2024; Zdorovenнова et al., 2025)), изменения ледовой фенологии на оз. Вендюрское за 30-летний период статистически не значимы. Причиной этого может быть недостаточная длина рядов наблюдений на этом озере, так как для нескольких разнотипных озер Карелии, на которых измерения проводятся за большие периоды времени, выявлены статистически значимые изменения ледовой фенологии. В частности, показано, что в 1950-2021 гг. как в крупных озерах Карелии Онежское, Сегозеро, Топозеро, Выгозеро, так и в средних по площади Сямозеро, Водлозеро, Ведлозеро (60-320 км²) и малых Ругозеро, Тулмозеро, (площадь менее 15 км²) происходило смещение сроков установления льда к более поздним датам на 1.3-4.1 сут. за 10 лет, а сроков очищения ото льда к более ранним на 1.1-2.0 сут. за 10 лет. В результате этих изменений продолжительность ледостава сократилась на этих озерах на 18-30 суток по сравнению со среднепогодовыми значениями (Ефремова и др., 2024).

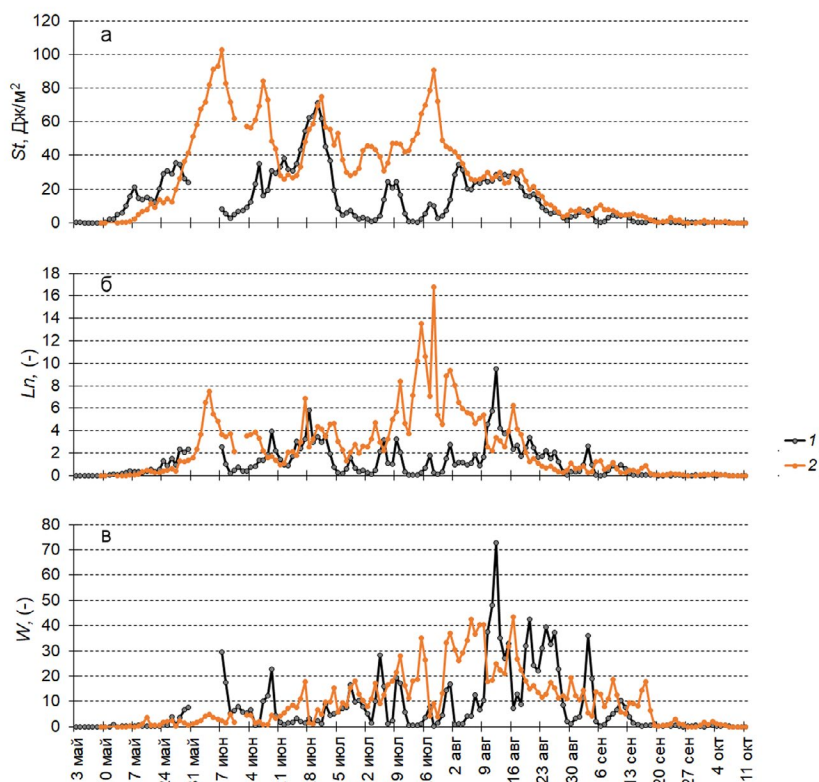


Рис.5. Устойчивость Шмидта St (а), озерное число L_n (б) и число Веддерберна W (в) в периоды открытой воды 2023 (1) и 2024 (2) гг.

Ранее для периода 1994-2020 гг. были получены значимые корреляционные зависимости дат установления и взлома льда в оз. Вендюрское от температуры воздуха в октябре-ноябре и апреле (Здоровеннова и др., 2022). По данным метеостанции Петрозаводск за период с 1994 по 2024 гг. температура воздуха в апреле практически не изменилась (скорость роста $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 10 лет), в октябре – незначительно увеличилась (скорость роста $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 10 лет), в ноябре – увеличилась существенно (скорость роста $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 10 лет). Можно предположить, что при сохранении существующих тенденций изменения температуры воздуха в октябре, ноябре и апреле можно ожидать сокращения продолжительности ледостава в оз. Вендюрское, главным образом, за счет более позднего установления льда.

4.2. Стратификация водной толщи и режим перемешивания

Формирование стратификации водной толщи в оз. Вендюрское обычно происходит в середине-конце мая (Смирнов и др., 2024). Однако летом над территорией Карелии часто проходят циклоны (Назарова, 2021), сопровождающиеся усилением ветра и понижением температуры воздуха на $5\text{--}10\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение нескольких дней. Такие погодные условия способствуют конвективному и ветровому перемешиванию, что может приводить к ослаблению стратификации и полному перемешиванию водной толщи (Mammarella et al., 2018). Согласно данным измерений в 2008-2021 гг., водная масса оз. Вендюрское на этапе открытой воды полностью перемешивалась несколько раз,

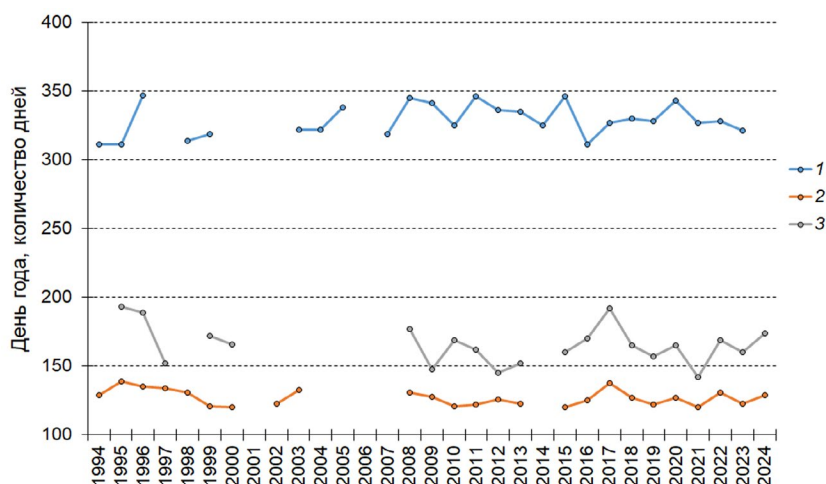


Рис.6. Даты начала (1), окончания (2) и продолжительность ледостава (3) в оз. Вендюрское в 1994-2024 гг.

то есть режим перемешивания озера был полимиктическим (Гавриленко и др., 2018; Пальшин и др., 2022). Даже в аномально теплый по погодным условиям июль и август 2010 г. (Ефремова и др., 2015; Смирнов и др., 2024) с превышением нормы 1961-1990 гг. по температуре воздуха на 3-6 °С, стратификация, установившаяся в мае, в июне была разрушена на фоне продолжительного похолодания, то есть, режим перемешивания озера не был димиктическим. В 2022 г. впервые за период наблюдений на автономной станции режим перемешивания оз. Вендюрского характеризовался всего двумя периодами полного перемешивания водной толщи – весной после схода льда (с 10 по 26 мая) и осенью (с 1 сентября до установления льда), то есть был димиктическим (Смирнов и др., 2024). В период открытой воды 2024 г. режим перемешивания озера, как и в 2022 г., также был димиктическим. Стратификация установилась 16 мая и была разрушена лишь во второй декаде сентября. Причиной этого были довольно теплые погодные условия всех месяцев с мая по сентябрь (среднемесячная температура воздуха в эти месяцы превышала норму 1961-1990 гг. на 0.9-6.5 °С) и пониженная ветровая нагрузка. Все это способствовало усилению устойчивости водной толщи оз. Вендюрское и препятствовало ее полному перемешиванию. Можно предположить,

что при сохранении тенденции потепления южной Карелии, режим перемешивания оз. Вендюрское будет все чаще становиться димиктическим, что согласуется с результатами модельных расчетов, предсказывающих такое изменение режима перемешивания озер умеренной зоны на фоне потепления климата (Kirillin, 2010). Очевидно, что такое изменение режима перемешивания будет представлять опасность для экосистемы озера, в первую очередь, за счет ухудшения кислородных условий.

На фоне теплой маловетренной погоды периода открытой воды 2024 г. устойчивость водной толщи оз. Вендюрское была выражена сильнее, чем в предыдущие годы (Рис. 7). Количество дней со значениями озерного числа $L_n > 1$, числа Веддерберна $W > 3$ и > 10 , устойчивости Шмидта $St > 5$ -30 Дж/м² в 2024 г. было больше, чем в предыдущие годы или соизмеримо с наиболее теплыми летними сезонами (2010, 2013, 2016 и 2022 гг.). Период с разницей температуры по столбу воды > 1 °С в оз. Вендюрское в 2024 г. продолжался 119 сут. с середины мая до конца сентября, что заметно превосходит данные предыдущих лет исследований (63-98 сут.) (Рис. 7, в). Период с разницей температуры по водному столбу > 2 °С в 2024 г. продолжался 108 сут., в предыдущие годы – от 38 до 96 сут.

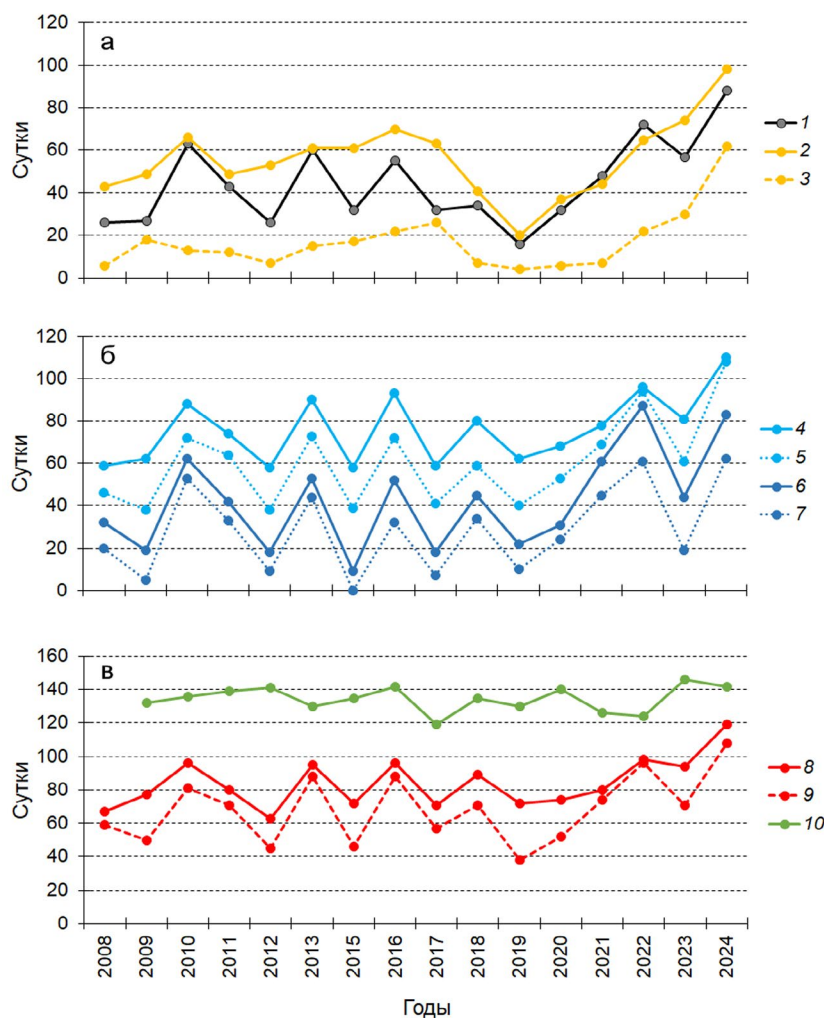


Рис.7. Количество дней в разные годы с характерными значениями параметров устойчивости водной толщи оз. Вендюрское: а – $L_n > 1$ (1), $W > 3$ (2), $W > 10$ (3), б – $St > 5$ (4), $St > 10$ (5), $St > 20$ (6), $St > 30$ (7), в – $dT > 1$ °С (8), $dT > 2$ °С (9), продолжительность «биологического» лета, когда температура верхнего слоя воды выше 10 °С (10).

За 15 лет измерений температуры воды на автономной станции в центральной части оз. Вендюрского не выявлено статистически значимого увеличения продолжительности «биологического» лета (Рис. 7, в). В годы измерений «биологическое» лето продолжалось от 119 до 146 сут., то есть, межгодовая изменчивость этого периода почти достигала месяца. Наиболее раннее начало этого периода – 14 мая 2016 г., наиболее позднее – 6 июня 2017 г. Наиболее раннее окончание «биологического» лета – 24 сентября 2019 г., наиболее позднее – 15 октября 2020 г. Анализ связи между продолжительностью «биологического» лета и температурой воздуха в мае и сентябре (коэффициенты детерминации 0.34 и 0.52 соответственно) показал, что более значима связь с температурой воздуха в сентябре.

4.3. Кислородный режим

Масштабные исследования озер умеренной зоны выявили ухудшение их кислородного режима за последние 60 лет на фоне увеличения продолжительности летней стратификации в результате потепления климата (Jane et al., 2021; Jansen et al., 2024). Результаты модельных расчетов подтверждают этот вывод: прогнозируется уменьшение содержания кислорода в озерах при повышении температуры воды и усилении стратификации водной толщи, препятствующей аэрации придонных слоев (Golosov et al., 2012).

Длительная стратификация летом 2024 г. спровоцировала аномальную продолжительность периода гипоксии (концентрация кислорода менее 2 мг/л) в придонном слое центральной котловины оз. Вендюрского, которая существовала почти 1.5 месяца с 14 июля по 26 августа. В предыдущие годы исследований, за исключением 2010 и 2022 гг., столь длительного периода дефицита кислорода летом не отмечалось, придонная гипоксия продолжалась не более 2-3 недель (Ефремова и др., 2015; Zdrovennova et al., 2016). В 2010 и 2022 гг. на фоне

жаркой маловетренной погоды придонная гипоксия также продолжалась с середины июля до конца августа (Ефремова и др., 2015).

В будущем при сохранении темпов регионального потепления можно ожидать ухудшения кислородных условий в оз. Вендюрское при увеличении периода стратификации.

Кислородный режим озера в период ледостава в 2022/23 и 2023/24 гг. характеризовался длительным – более четырех месяцев – существованием придонной анаэробной зоны в центральной котловине озера. По данным 2007-2020 гг. было показано, что наиболее неблагоприятные кислородные условия складываются в оз. Вендюрское в зимы с ранним ледоставом и высокой температурой придонного слоя воды в конце зимы (Zdrovennova et al., 2021). Значения показателя C_t/C_0 для зимних сезонов 2022/23 и 2023/24 гг. были проанализированы совместно с данными 2007-2021 гг. (Рис. 8). Линейная корреляция минимальных значений C_t/C_0 в конце зимы с датой установления льда (Рис. 8, а) и максимальной температурой придонной воды за зиму (Рис. 8, б) по данным 2007-2024 гг. характеризуется довольно высокими значениями коэффициента детерминации (0.36 и 0.53 соответственно). Если предположить, что даты установления льда на оз. Вендюрское будут сдвигаться на более поздние сроки, то в зимний период можно ожидать улучшения кислородных условий.

5. Заключение

Проведенный анализ данных автономной станции в небольшом озере Вендюрское южной Карелии позволил выявить особенности температурного и кислородного режимов и режима перемешивания в период с октября 2022 г. по октябрь 2024 г. Погодные условия периода исследований обусловили изменения как в продолжительности стратификации и гипоксии в летний период, так и изменение режима перемешивания озера в 2024 г.

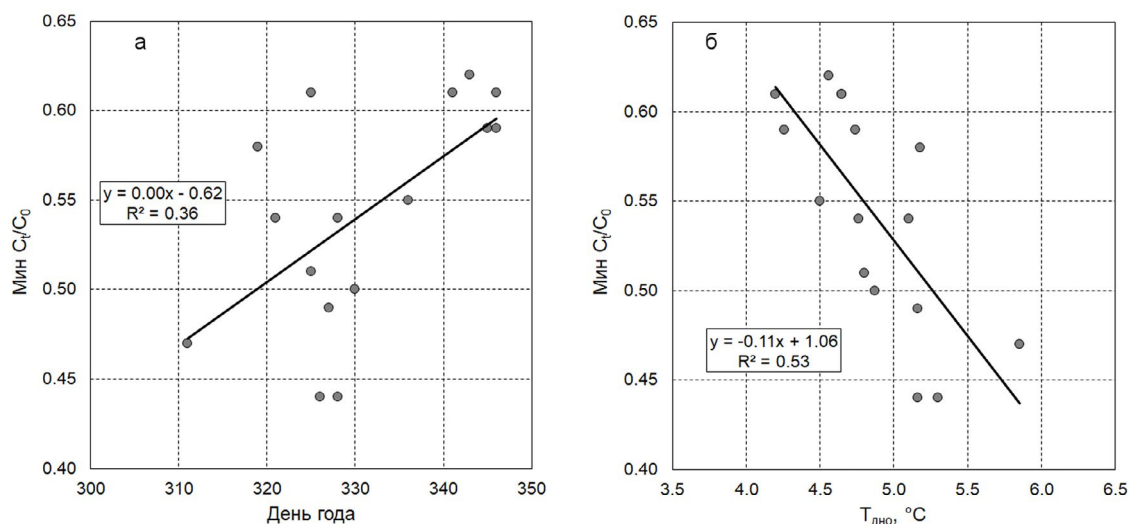


Рис.8. Минимальное значение C_t/C_0 в конце зимы в 2007-2024 гг. в зависимости от даты установления льда (а) и температуры придонного слоя воды в конце зимы (б). Прямые линии – линейные тренды.

В период открытой воды 2024 г., как и ранее в 2022 г., режим перемешивания оз. Вендюрское соответствовал димиктическому типу (с двумя периодами полного перемешивания водной толщи – весной после схода льда и осенью), в другие годы измерений режим перемешивания озера был полимиктическим (несколько эпизодов перемешивания за период открытой воды).

Можно предположить, что при текущих тенденциях региональной климатической изменчивости (повышение температуры летних месяцев), существует опасность того, что озеро Вендюрское все дольше будет оставаться стратифицированным в период открытой воды, и его режим перемешивания все чаще будет димиктическим. Наряду с деятельностью форелевого хозяйства, это в перспективе грозит существенным ухудшением кислородных условий, что актуализирует необходимость продолжения мониторинговых измерений температуры и растворенного кислорода в этом озере.

Истощение кислорода в озере в зимний период больше в зимы с более ранним ледоставом и более высокой температурой придонной воды. Учитывая зависимость дат установления льда на озере от температуры воздуха в ноябре, можно предположить, что при продолжающемся потеплении осеннего периода начало ледостава в оз. Вендюрское будет сдвигаться на более поздние сроки, и кислородные условия в озере зимой будут улучшаться.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках темы государственного задания Карельского научного центра РАН «Роль гидрофизических процессов в экосистемах мелководных озер. Современное состояние и прогноз развития экосистем малых озер Карелии при антропогенном воздействии и климатических изменениях» FMEN-2021-0019. Авторы выражают благодарность Митрохову А.В. за помощь в проведении полевых исследований.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Гавриленко Г.Г., Здоровеннова Г.Э., Волков С.Ю. и др. 2018. Устойчивость водной массы и ее влияние на кислородный режим полимиктического озера. Геополитика и экогеодинамика регионов 4(14): 57-71.

Галахина Н.Е., Зобков М.Б. 2022. Гидрохимические исследования в районе расположения форелевых хозяйств в Кондопожской губе Онежского озера в зимний период 2022 года. Труды КарНЦ РАН 6: 76-87. DOI: [10.17076/lim1599](https://doi.org/10.17076/lim1599)

Ефремова Т.В., Пальшин Н.И., Здоровеннова Г.Э. и др. 2015. Влияние экстремально жаркого лета 2010 г. на температуру воды и распределение кислорода в озерах Карелии. Метеорология и гидрология 9: 67-75.

Ефремова Т.В., Пальшин Н.И., Кравченко Т.Г. и др. 2024. Влияние изменений климата на термический и ледовый режим озер Карелии по данным многолетних наблюдений (1950-2021 гг.). Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Лимнология в России», посвященной 80-летию Института озераведения Российской академии наук. Санкт-Петербург, 12–14 февраля 2024 г. Санкт-Петербург: РАН, С. 160-161. DOI: [10.12731/978-5-907645-54-7](https://doi.org/10.12731/978-5-907645-54-7)

Здоровеннова Г.Э., Голосов С.Д., Пальшин Н.И. и др. 2022. Зимний термический и ледовый режимы малых озер Карелии на фоне региональной климатической изменчивости. Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле 67(1): 138-155. DOI: [10.21638/spbu07.2022.108](https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.108)

Здоровеннова Г.Э., Пальшин Н.И., Здоровеннов Р.Э. и др. 2024. Кислородный режим озера Вендюрское в условиях функционирования форелевого хозяйства. Труды КарНЦ РАН. Серия Экологические исследования 8: 73-83. DOI: [10.17076/eco1988](https://doi.org/10.17076/eco1988)

Здоровеннов Р.Э., Ефремова Т.В., Пальшин Н.И. и др. 2021. Роль термогидрофизических процессов в распределении хлорофилла «а» в водной толще малого мезотрофного озера. Известия Русского географического общества 153(3): 47-62. DOI: [10.31857/S0869607121030083](https://doi.org/10.31857/S0869607121030083)

Кучко Я.А., Савосин Е.С. 2020. Оценка состояния сообществ зоопланктона и макрозообентоса экосистемы Маслозера в зоне размещения форелевого хозяйства. Рыбоводство и рыбное хозяйство 5(172): 10-20.

Михайленко В.Г., Стерлигова О.П. 2021. Некоторые экологические аспекты садкового выращивания радужной форели. Труды КарНЦ РАН. Серия Экологические исследования 12: 82-90. DOI: [10.17076/eco1509](https://doi.org/10.17076/eco1509)

Назарова Л.Е. 2021. Климатические условия на территории Карелии. В: Современные исследования водоемов Севера: учебное пособие. Петрозаводск: КарНЦ РАН, С. 7-16.

Озера Карелии. Справочник. 2013. В: Филатова Н.Н., Кухарева В.И. (Ред.). Петрозаводск: КарНЦ РАН.

Пальшин Н.И., Ефремова Т.В., Богданов С.Р. и др. 2022. Эмпирическая модель термической структуры малого полимиктического озера для периода открытой воды. Известия Русского географического общества 154(2): 61-76. DOI: [10.31857/S0869607122020033](https://doi.org/10.31857/S0869607122020033)

Петров М.П., Тержевик А.Ю., Здоровеннов Р.Э. и др. 2006. Особенности термической структуры мелководного озера в начале зимы. Водные ресурсы 33(2): 154-162.

Петров М.П., Тержевик А.Ю., Пальшин Н.И. и др. 2005. Поглощение солнечной радиации снежно-ледовым покровом озер. Водные ресурсы 32(5): 546-554.

Расписание погоды. 2025. Сайт. Rp5.ru URL: <https://rp5.ru/> (дата обращения 8 июля 2025 г.).

Савосин Е.С., Кучко Я.А., Савосин Д.С. и др. 2023. Гидробиоценозы озера Малое Янисъярви (Южная Карелия) в условиях товарного выращивания форели. Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство 4: 26-33. DOI: [10.24143/2073-5529-2023-4-26-33](https://doi.org/10.24143/2073-5529-2023-4-26-33)

Смирнов С.И., Здоровеннов Р.Э., Ефремова Т.В. и др. 2024. Параметры устойчивости водной толщи небольшого полимиктического озера в разные по погодным условиям годы. Водные ресурсы 51(3): 345-360. DOI: [10.31857/S0321059624030115](https://doi.org/10.31857/S0321059624030115)

Стерлигова О.П., Ильмаст Н.В. 2023. Ихтиологические и гидробиологические исследования в Карелии. Труды Карельского научного центра РАН 3: 113-124. DOI: [10.17076/eco1777](https://doi.org/10.17076/eco1777)

Стерлигова О.П., Савосин Е.С., Кучко Я.А. и др. 2023. Состояние экосистемы озера Хедо (Западная Карелия) в условиях рыболовной деятельности. Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство 2: 15-23. DOI: [10.24143/2073-5529-2023-2-15-23](https://doi.org/10.24143/2073-5529-2023-2-15-23)

Терзевик А.Ю., Пальшин Н.И., Голосов С.Д. и др. 2010. Гидрофизические аспекты формирования кислородного режима мелководного озера, покрытого льдом. Водные ресурсы 37(5): 568-579.

Desgué-Itier O., Melo Vieira Soares L., Anneville O. et al. 2023. Past and future climate change effects on the thermal regime and oxygen solubility of four peri-alpine lakes. *Hydrology and Earth System Sciences* 27: 837-859. DOI: [10.5194/hess-27-837-2023](https://doi.org/10.5194/hess-27-837-2023)

Filatov N., Baklagin V., Efremova T. et al. 2019. Climate change impacts on the watersheds of lakes Onego and Ladoga from remote sensing and in situ data. *Inland Waters* 9(2): 130-141. DOI: [10.1080/20442041.2018.1533355](https://doi.org/10.1080/20442041.2018.1533355)

Golosov S., Zverev I., Terzhevik A., et al. 2012. Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lake. *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 64(1): 17264. DOI: [10.3402/tellusa.v64i0.17264](https://doi.org/10.3402/tellusa.v64i0.17264)

Jane S.F., Hansen G.J.A., Kraemer B.M. et al. 2021. Widespread deoxygenation of temperate lakes. *Nature* 594: 66-70. DOI: [10.1038/s41586-021-03550-y](https://doi.org/10.1038/s41586-021-03550-y)

Jansen J., Simpson G.L., Weyhenmeyer G.A. et al. 2024. Climate-driven deoxygenation of northern lakes. *Nature Climate Change* 14(8): 832-838. DOI: [10.1038/s41558-024-02058-3](https://doi.org/10.1038/s41558-024-02058-3)

Kirillin G. 2010. Modeling the impact of global warming on water temperature and seasonal mixing regimes in small temperate lakes. *Boreal Environment Research* 15: 279-293.

Leppäranta M., Terzhevik A., Shirasawa K. 2010. Solar radiation and ice melting in Lake Vendyurskoe, Russian Karelia. *Nordic Hydrology* 41(1): 60-62. DOI: [10.2166/nh.2010.122](https://doi.org/10.2166/nh.2010.122)

Magee M.R., Wu C.H. 2017. Response of water temperatures and stratification to changing climate in three lakes with different morphometry. *Hydrology and Earth System Sciences* 21: 6253-6274. DOI: [10.5194/hess-21-6253-2017](https://doi.org/10.5194/hess-21-6253-2017)

Mammarella I., Gavrilenko G., Zdorovenнова G. et al. 2018. Effects of similar weather patterns on the thermal stratification, mixing regimes and hypolimnetic oxygen depletion in two boreal lakes with different water transparency. *Boreal Environment Research* 23: 237-247.

North R.P., North R.L., Livingstone D.M. et al. 2014. Long-term changes in hypoxia and soluble reactive phosphorus in the hypolimnion of a large temperate lake: consequences of a climate regime shift. *Global Change Biology* 20: 811-823. DOI: [10.1111/gcb.12371](https://doi.org/10.1111/gcb.12371)

O'Reilly C.M., Sharma S., Gray D.K. et al. 2015. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Geophysical Research Letters* 42: 10773-10781. DOI: [10.1002/2015GL066235](https://doi.org/10.1002/2015GL066235)

Piccioni F., Casenave C., Lemaire B.J. et al. 2021. The thermal response of small and shallow lakes to climate change: new insights from 3D hindcast modelling. *Earth System Dynamics* 12: 439-456. DOI: [10.5194/esd-12-439-2021](https://doi.org/10.5194/esd-12-439-2021)

Piccolroaz S., Woolway R.I., Merchant C.J. 2020. Global reconstruction of twentieth century lake surface water temperature reveals different warming trends depending on the climatic zone. *Climatic Change* 160: 427-442. DOI: [10.1007/s10584-020-02663-z](https://doi.org/10.1007/s10584-020-02663-z)

Pilla R.M., Williamson C.E., Adamovich B.V. et al. 2020. Deeper waters are changing less consistently than surface waters in a global analysis of 102 lakes. *Scientific Reports* 10: 20514. DOI: [10.1038/s41598-020-76873-x](https://doi.org/10.1038/s41598-020-76873-x)

Råman Vinnå L., Medhaug I., Schmid M. et al. 2021. The vulnerability of lakes to climate change along an altitudinal gradient. *Communications Earth and Environment* 2(35):1-10. DOI: [10.1038/s43247-021-00106-w](https://doi.org/10.1038/s43247-021-00106-w)

Read J.S., Hamilton D.P., Jones I.D. et al. 2011. Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data. *Environmental Modelling & Software* 26: 1325-1336. DOI: [10.1016/j.envsoft.2011.05.006](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.05.006)

Robertson D.M., Imberger J. 1994. Lake Number a Quantitative Indicator of Mixing Used to Estimate Changes in Dissolved Oxygen. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie* 79: 159-176. DOI: [10.1002/iroh.19940790202](https://doi.org/10.1002/iroh.19940790202)

Shatwell T., Thiery W., Kirillin G. 2019. Future projections of temperature and mixing regime of European temperate lakes. *Hydrology and Earth System Sciences* 23: 1533-1551. DOI: [10.5194/hess-23-1533-2019](https://doi.org/10.5194/hess-23-1533-2019)

Tekanova E., Sidelev S., Kalinkina N. et al. 2024. Toxigenic cyanobacteria and microcystins in a large Northern oligotrophic Lake Onego, Russia. *Toxins* 16(11): 457. DOI: [10.3390/toxins16110457](https://doi.org/10.3390/toxins16110457)

Terzhevik A., Palshin N., Mitrokhov A. et al. 2009. Some features of the thermal and dissolved oxygen structure in boreal, shallow ice-covered Lake Vendyurskoe, Russia. *Aquatic Ecology* 43(3): 617-627. DOI: [10.1007/s10452-009-9288-x](https://doi.org/10.1007/s10452-009-9288-x)

Woolway R.I., Merchant C.J. 2019. Worldwide alteration of lake mixing regimes in response to climate change. *Nature Geosciences* 12: 271-276. DOI: [10.1038/s41561-019-0322-x](https://doi.org/10.1038/s41561-019-0322-x)

Woolway R.I., Sharma S., Weyhenmeyer G.A. et al. 2021. Phenological shifts in lake stratification under climate change. *Nature Communications* 12: 2318. DOI: [10.1038/s41467-021-22657-4](https://doi.org/10.1038/s41467-021-22657-4)

Zdorovenнова G., Palshin N., Golosov S. et al. 2021. Dissolved Oxygen in a Shallow Ice-Covered Lake in Winter: Effect of Changes in Light, Thermal and Ice Regimes. *Water* 13(17): 2435. DOI: [10.3390/w13172435](https://doi.org/10.3390/w13172435)

Zdorovenнова G., Palshin N., Zdorovennov R. et al. 2016. The oxygen regime of a shallow lake. *Geography, Environment, Sustainability* 9(2): 47-57. DOI: [10.15356/2071-9388_02v09_2016_04](https://doi.org/10.15356/2071-9388_02v09_2016_04)

Zdorovennov R., Palshin N., Zdorovenнова G. et al. 2013. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake. *Estonian Journal of Earth Sciences* 61(1): 26-32. DOI: [10.3176/earth.2013.03](https://doi.org/10.3176/earth.2013.03)

Zdorovenнова G., Efremova T., Novikova I. et al. 2025. Contrasting Changes in Lake Ice Thickness and Quality Due to Global Warming in the Arctic, Temperate, and Arid Zones and Highlands of Eurasia. *Water* 17(3):365. DOI: [10.3390/w17030365](https://doi.org/10.3390/w17030365)

Zhang Y., Wu Z., Liu M. et al. 2015. Dissolved oxygen stratification and response to thermal structure and long-term climate change in a large and deep subtropical reservoir (Lake Qiandaohu, China). *Water Research* 75: 249-258. DOI: [10.1016/j.watres.2015.02.052](https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.052)