

УДК 556.555.4

ОСОБЕННОСТИ ТЕРМИЧЕСКОГО И ЛЕДОВОГО РЕЖИМОВ ЗАЛИВОВ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА ПО ДАННЫМ МНОГОЛЕТНИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Т. В. Ефремова^{1*}, Т. Г. Кравченкова², Н. И. Пальшин¹

¹ Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(пр. Александра Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030),
*efremova@nwpi.krc.karelia.ru

² Карельский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды –
филиал ФГБУ «Северо-Западное УГМС» (наб. Варкауса, 3, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185031)

На основании анализа наблюдений Карельского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ЦГМС) за 1953–2024 гг. в Петрозаводской, Кондопожской и Большой губе Повенецкого залива Онежского озера выявлены особенности реакции ледовой фенологии и температуры поверхностного слоя воды в прибрежной зоне на изменения климата. Анализ данных наблюдений за температурой воздуха свидетельствует о сохраняющемся устойчивом потеплении регионального климата в бассейне озера во все сезоны года. Установлены статистически значимые тренды смещения дат начала ледостава на более поздние сроки со скоростью +2,3–3,0 сут/10 лет, а дат окончания ледостава на более ранние со скоростью –1,9–2,6 сут/10 лет. Продолжительность ледостава во всех заливах сократилась на 35 суток. Проанализированы особенности изменения температуры поверхностного слоя воды в заливах. Определено, что за 70-летний период линейный тренд средней температуры воды в июне–октябре составил в Петрозаводской губе 0,34 °C/10 лет, в Кондопожской – 0,47 °C/10 лет и в Большой губе – 0,37 °C/10 лет. В результате роста температуры поверхностного слоя воды период прямой стратификации (температура воды > 4 °C) увеличился в заливах на 20–30 суток, а продолжительность периода с температурой воды > 10 °C («биологическое лето») – на 30–40 суток.

Ключевые слова: Онежское озеро; термический режим; изменение климата; ледовая фенология; температура воды

Для цитирования: Ефремова Т. В., Кравченкова Т. Г., Пальшин Н. И. Особенности термического и ледового режимов заливов Онежского озера по данным многолетних наблюдений // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 9. С. 29–40. doi: 10.17076/lim2396

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания КарНЦ РАН (FMEN 2026-0011, Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН).

T. V. Efremova^{1*}, T. G. Kravchenkova², N. I. Palshin¹. FEATURES OF THE THERMAL AND ICE REGIME OF LAKE ONEGO BAYS BASED ON LONG-TERM OBSERVATIONS

¹Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *efremova@nwpi.krc.karelia.ru

²Karelian Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring – branch of the Northwestern Hydrometeorology and Environmental Monitoring Administration (3 Varkaus St., 185031 Petrozavodsk, Karelia, Russia)

An analysis of the observations carried out by the Karelian Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (CHM) in 1953–2024 in the Petrozavodsk, Kondopozhskaya, and Bolshaya Bays of the Gulf of Povenets, Lake Onego, revealed patterns in the response of ice phenology and surface water temperature in the inshore zone to climate change. The analysis of air temperature data indicates persistent, stable warming of the regional climate in the lake basin throughout the year. It was found that there was a statistically significant trend in the ice-on dates of all lakes toward later dates at a rate of +2.3–3.0 days/10 years, and the ice-off dates toward earlier dates at a rate of –1.9–2.6 days/10 years. The ice duration has decreased by 35 days. Patterns of surface water temperature changes in the bays were analyzed. It was determined that the 70-year linear trend of the average water temperature in June–October was 0.34 °C/10 years in Petrozavodsk Bay, 0.47 °C/10 years in Kondopozhskaya Bay, and 0.37 °C/10 years in Bolshaya Bay. As a result of the increase in the temperature of the surface layer of water, the stratification period (water temperature of > 4 °C) in the bays increased by 20–30 days, and the duration of the period with water temperatures > 10 °C (“biological summer”) increased by 30–40 days.

Keywords: Lake Onego; thermal regime; climate change; ice phenology; water temperature

For citation: Efremova T. V., Kravchenkova T. G., Palshin N. I. Features of the thermal and ice regime of Lake Onego bays based on long-term observations. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 9. P. 29–40. doi: 10.17076/lim2396

Funding. The study was funded from the Russian federal budget through state assignment (FMEN 2026-0011) to the Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre RAS.

Введение

В связи глобальным потеплением климата особый интерес вызывает реакция экосистем водоемов на происходящие климатические изменения. Одно из решающих воздействий на функционирование озерных экосистем оказывают изменения ледового и термического режимов. Многочисленные исследования ледовой фенологии озер в Северном полушарии показали, что сроки замерзания озер сместились к более поздним датам, а сроки разрушения льда – к более ранним, и следовательно, к меньшей продолжительности ледостава [Magnuson et al., 2000; Benson et al., 2012; Sharma et al., 2021; Basu et al., 2024], при этом растет температура поверхностного слоя воды озер [Schneider, Hook, 2010; O'Reilly et al., 2015; Ефремова и др., 2016; Woolway et al., 2020]. Наиболее быстрые темпы повышения температуры

воды наблюдаются в крупных глубоководных озерах Европейского Севера и Северной Америки [O'Reilly et al., 2015; Woolway, Merchant, 2017].

В последние десятилетия широко используются данные спутниковых наблюдений температуры поверхности воды, но, как правило, эти данные характеризуют температуру воды в центре водоема, что может не отражать темпы потепления в других районах крупного озера [Woolway, Merchant, 2018]. Онежское озеро – второй по величине глубоководный водоем Европы, котловина которого отличается крайне сложным строением: глубоководным центральным плесом и сильно изрезанной береговой линией с многочисленными заливами и губами. В настоящее время накоплены данные многолетних натурных наблюдений в заливах озера, которые помогут оценить изменения термических характеристик за длительные периоды

и улучшить наше понимание пространственной реакции на изменения климата в большой озерной системе Онежского озера.

Изменения многолетних натуральных наблюдений ледовых характеристик и температуры поверхности воды Онежского озера рассматривались в ряде публикаций на примере Петрозаводской губы [Крупнейшие..., 2015; Filatov et al., 2019; Диагноз..., 2020; Ефремова и др., 2026]. В данной работе для оценки особенностей изменчивости ледово-термических характеристик на акватории озера кроме Петрозаводской губы мы впервые используем данные наблюдений в Кондопожской губе и Большой губе Повенецкого залива Онежского озера за 70-летний период (1953–2024 гг.). Цель работы – статистический анализ изменений в долгосрочных временных рядах температуры воздуха, ледовой фенологии и температуры поверхности воды в трех заливах Онежского озера.

Материалы и методы

В настоящем исследовании характеристика термического и ледового режимов Петрозаводской, Кондопожской и Большой губы Повенецкого залива Онежского озера основана на статистической обработке и анализе данных многолетних регулярных наблюдений гидрологических постов Карельского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ЦГМС) за 1953–2024 гг. За начало периода исследований был принят 1953 год, когда в результате строительства Верхне-Свирской гидроэлектростанции Онежское озеро стало водохранилищем.

В статистическом анализе для характеристики ледового режима использовались визуально определяемые наблюдателем гидрологического поста даты начала и окончания ледостава в заливах. Датой начала ледостава считается первый день, когда озеро в поле зрения наблюдательного пункта было покрыто устойчивым неподвижным льдом (продолжительностью не менее 20 суток). Окончанию ледостава соответствует дата, предшествующая первой дате появления ледяных полей, битого льда, дрейфа льда под действием ветра. Для характеристики изменений температуры поверхности воды использовались осредненные за декаду многолетние данные ежедневных измерений температуры воды у берега на гидрологических постах в исследуемых заливах. Даты перехода температуры воды весной и осенью через 4 °C (начало и окончание периода, когда возможно формирование прямой термической стратификации) и через 10 °C

(так называемое «биологическое лето») определялись как даты устойчивого перехода измеренных срочных значений температуры воды через указанные пределы. Для оценки влияния температуры воздуха на ледовую фенологию и температуру поверхности воды использовались данные наблюдений метеостанций (МС) в городах Петрозаводск для Петрозаводской губы, Кондопога для Кондопожской губы и Медвежьегорск для Большой губы Повенецкого залива (рис. 1).

Для анализа трендов при обработке натуральных данных временных рядов применялся метод линейной регрессии. Уровень статистической значимости трендов оценивали на основе t -статистики Стьюдента. Для оценки статистической значимости трендов использовался 5%-й уровень ($p < 0,05$).

Петрозаводская губа расположена в западной части Онежского озера (рис. 1), площадь зеркала 73 км², средняя глубина 16 м, максимальная глубина 30 м. Кондопожская губа имеет площадь зеркала 225 км², среднюю глубину 21 м, максимальную глубину 75 м. Большая губа Повенецкого залива находится в самой северной части озера, площадь ее зеркала 117 км², средняя глубина – 32 м, максимальная – 94 м.



Рис. 1. Расположение гидрологических постов в заливах Онежского озера

Fig. 1. Location of hydrological observation posts in the bays of Lake Onega

Воды этих заливов испытывают наибольшую антропогенную нагрузку от промышленных центров – городов Петрозаводск, Кондопога и Медвежьегорск [Крупнейшие..., 2015].

Результаты и обсуждение

Температура воздуха

Температура воздуха признана наиболее важным климатическим фактором изменений термического режима озер. Изменения средней годовой температуры воздуха на метеостанциях Петрозаводск, Кондопога, Медвежьегорск за рассматриваемый период наблюдений (1953–2024 гг.) почти синхронны (рис. 2).

Наименьшие значения температуры воздуха регистрируются на самой северной МС в Медвежьегорске, особенно в зимний период; в Петрозаводске и Кондопоге разница среднемесячных и среднегодовых температур минимальна. Согласно современной климатической норме (1991–2020 гг.) среднегодовая температура воздуха составила 3,6 °C на МС Петрозаводск, 3,7 °C на МС Кондопога и 2,9 °C на МС Медвежьегорск [Гидрометцентр..., 2026]. По сравнению с предыдущей климатической нормой (1961–1990 гг.) среднегодовая температура воздуха выросла на рассматриваемых метеостанциях на 1,1–1,4 °C. Потепление отмечается во все сезоны и все месяцы года. Наибольшие изменения отмечены в зимние месяцы: в среднем на 2,3–2,6 °C, в январе – на 3,1–3,3 °C.

Наименьшее увеличение температуры воздуха зарегистрировано в июне и октябре – на 0,6 °C. В остальные месяцы года увеличение температуры воздуха составило ~ 1 °C.

Анализ линейных трендов среднегодовой, сезонной и месячной температуры воздуха на метеостанциях выполнен за периоды 1953–2024 и 1976–2024 гг. Первая половина срока (1953–1976 гг.) – тенденции потепления в озерах не обнаружены, с 1976 года – фаза значительного роста температуры воздуха. 1976 год принят Росгидрометом за год начала современного потепления глобальной температуры воздуха [Доклад..., 2026]. Для всех пунктов наблюдений линейные тренды температуры воздуха положительны, значимы и составляют для среднегодовой температуры за период 1953–2024 гг. 0,32–0,35 °C/10 лет, а за период 1976–2024 гг. 0,56–0,63 °C/10 лет (скорости потепления увеличиваются приблизительно в два раза) (табл. 1). Наибольшая скорость роста отмечена на МС в Медвежьегорске, наименьшая – на МС в Петрозаводске.

Во внутригодовом ходе изменение сезонных значений температуры воздуха происходило неравномерно: наибольшая скорость потепления за весь 70-летний период наблюдалась зимой (0,42–0,50 °C/10 лет) и весной (0,35–0,41 °C/10 лет), наименьшая – летом (0,24–0,28 °C/10 лет) и осенью (0,26–0,27 °C/10 лет).

Анализ трендов временных рядов с 1976 г. показал наибольшую скорость потепления зимой (0,80–0,93 °C/10 лет), причем максимальные темпы потепления наблюдались в декабре:

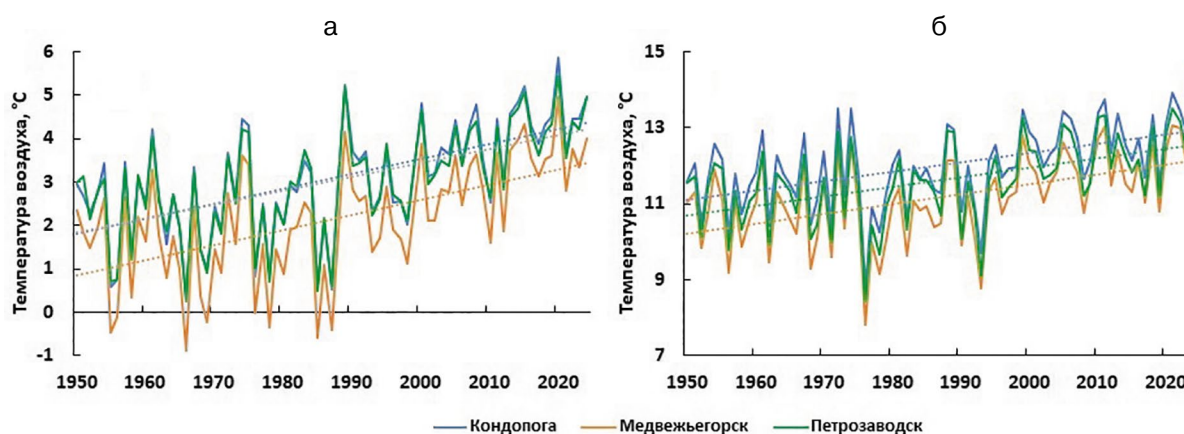


Рис. 2. Среднегодовая температура воздуха (а); средняя температура воздуха за период открытой воды (июнь–октябрь) (б). Данные метеостанций Петрозаводск, Кондопога, Медвежьегорск; прямые линии – линии трендов за период 1953–2024 гг.

Fig. 2. Average annual air temperature (a); average air temperature during the open water period (June–October) (b); data from the weather stations of Petrozavodsk, Kondopoga, and Medvezhyegorsk; straight lines – trend lines for the period 1953–2024

Таблица 1. Оценки линейных трендов скорости повышения температуры приземного воздуха (°C/10 лет) на МС Петрозаводск, Кондопога, Медвежьегорск, осредненной по сезонам года за 1953–2024 и 1976–2024 гг. ($p < 0,01$)

Table 1. Assessment of linear trends in the rate of increase in surface air temperature (°C/10 years) at the weather stations of Petrozavodsk, Kondopoga, and Medvezhyegorsk, averaged over the seasons of the year for the periods 1953–2024 and 1976–2024 ($p < 0.01$)

Период Period	Петрозаводск Petrozavodsk		Кондопога Kondopoga		Медвежьегорск Medvezhyegorsk	
	1953–2024	1976–2024	1953–2024	1976–2024	1953–2024	1976–2024
зима winter	0,42	0,81	0,47	0,93	0,50	0,80
весна spring	0,35	0,36	0,40	0,41	0,41	0,42
лето summer	0,25	0,49	0,24	0,48	0,28	0,59
осень autumn	0,26	0,49	0,26	0,55	0,27	0,59
июнь–октябрь June–October	0,25	0,50	0,25	0,51	0,26	0,56
год year	0,32	0,56	0,34	0,60	0,35	0,63

0,86 °C/10 лет в Петрозаводске, 1,10 °C/10 лет в Кондопоге и Медвежьегорске. Летом и осенью отмечаются темпы потепления 0,48–0,59 °C/10 лет, а наименьшие темпы потепления характерны для весны (0,36–0,42 °C/10 лет). Особо выделен период с июня по октябрь, когда в заливах Онежского озера отсутствует лед. Скорость потепления в период открытой воды составила 0,50–0,56 °C/10 лет, с максимальными значениями в сентябре (0,66–0,72 °C/10 лет), что связано, вероятно, с рекордными температурами воздуха в сентябре 2023 и 2024 годов.

Ледовая фенология

Наблюдающийся в последние десятилетия рост температуры воздуха, особенно в зимний сезон, привел к изменению ледового режима озер Карелии: ледостав стал устанавливаться в более поздние сроки, заканчиваться в более ранние, а следовательно, сократилась его продолжительность [Ефремова и др., 2026]. Онежское озеро за исследуемый период ежегодно полностью покрывалось льдом, за исключением аномально мягкой зимы 2019/20 гг., когда максимально льдом было покрыто лишь 58,5 % площади озера [Калинкина и др., 2021].

Для установления статистических связей между температурой воздуха и сроками ледовой фенологии часто используются средние температуры за фиксированные календарные периоды [Ефремова, Пальшин, 2011]. Согласно нашим оценкам, дата замерзания во всех

заливах лучше всего коррелирует со средней температурой воздуха за ноябрь–декабрь (коэффициент корреляции $r = 0,80$ для Петрозаводской губы; для Кондопожской губы $r = 0,73$ и для Большой губы $r = 0,76$). Даты окончания ледостава коррелируют со средней температурой воздуха за апрель в Кондопожской ($r = -0,72$) и Большой ($r = -0,74$) губах и со средней температурой воздуха за март–апрель в Петрозаводской губе ($r = -0,67$).

Средняя дата начала ледостава в 1991–2020 гг. в Кондопожской губе – 8 декабря, в Большой губе – 22 декабря, в Петрозаводской губе – 26 декабря. По сравнению с предыдущим тридцатилетием дата начала ледостава сместилась на 10 суток к более поздней. За весь период наблюдений (1953–2024 гг.) в исследуемых заливах самая ранняя дата установления ледостава в Кондопожской губе – 10 ноября 1993 г., в Петрозаводской губе – 18 ноября 1993 г., в Большой губе Повенецкого залива – 24 ноября 1993 г. Самая поздняя дата начала ледостава в Кондопожской губе – 9 января зимой 2011/12 гг., в Петрозаводской губе – 31 января зимой 2019/20 гг. и в Большой губе – 28 января зимой 2019/20 гг. Таким образом, сроки начала ледостава во всех заливах отличаются на два месяца (рис. 3, а). Самое раннее начало ледостава среди трех заливов наблюдается в Кондопожской губе. Это связано с тем, что пост наблюдений находится в вершинной мелководной части губы, сама же губа изолирована от основного плеса озера Шардонскими островами, препятствующими водообмену,

а, например, для Петрозаводской губы характерен более интенсивный водообмен с центральной акваторией озера [Ефремова, Пальшин, 1989]. Большая губа Повенецкого залива – самый северный залив Онежского озера – замерзает на две недели позже Кондопожской губы. Причина в том, что это самый глубоководный залив, которому требуется больше времени для охлаждения осенью и, соответственно, большая сумма зимних отрицательных температур для образования ледяного покрова [Ресурсы..., 1972].

Сроки окончания ледостава в заливах показывают более высокую степень когерентности по сравнению со сроками его начала (рис. 3, б). В базовый период (1991–2020 гг.) средняя дата окончания ледостава в Петрозаводской и Кондопожской губах наблюдалась 27 апреля, в Большой губе Повенецкого залива – 5 мая. Современная норма по сравнению с предыдущей изменилась к более ранней на 5 суток в Большой губе, на 7 суток в Петрозаводской и Кондопожской губах. Самая ранняя дата окончания ледостава наблюдалась в Петрозаводской губе – 13 марта 2020 г., в Кондопожской губе – 2 апреля 2020 г., в Большой губе – 19 апреля 2013 г. Самая поздняя дата окончания

ледостава в Кондопожской губе – 17 мая 1956 г., в Петрозаводской губе – 19 мая 1956 г., в Большой губе – 30 мая 1956 г. Продолжительность ледостава в Большой губе изменялась от 85 суток зимой 2019/20 гг. до 181 суток зимой 1955/56 гг., в Кондопожской губе – от 95 суток зимой 2019/20 гг. до 180 суток зимой 1973/74 гг., в Петрозаводской губе – от 43 суток зимой 2019/20 гг. до 170 суток зимой 1973/74 гг. За период 1991–2020 гг. средняя продолжительность ледостава составила 123 суток в Петрозаводской губе, 135 суток в Большой губе и 141 сутки в Кондопожской губе.

Выполненный регрессионный анализ временных рядов ледовых событий в заливах Онежского озера показал, что за весь исследуемый период (1953–2024 гг.) сроки начала ледостава смещались к более поздним датам со скоростью +2,3–3,0 сут/10 лет (табл. 2). Окончание ледостава в заливах стало происходить раньше со скоростью –1,9–2,6 сут/10 лет. В результате более позднего замерзания и более раннего окончания продолжительность ледостава за период 1953–2024 гг. сокращалась со скоростью –4,9–5,1 сут/10 лет, а за период 1976–2024 гг. – со скоростью –6,8–8,0 сут/10 лет. Полученные нами оценки

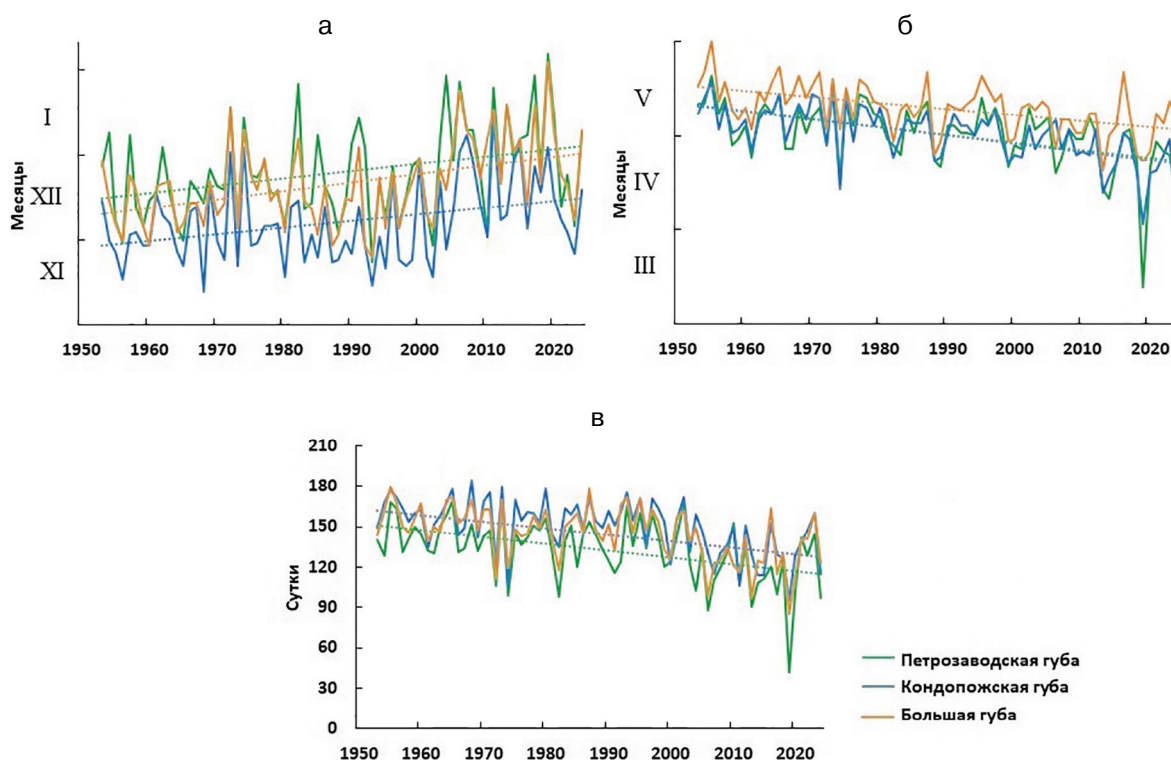


Рис. 3. Межгодовая изменчивость сроков начала ледостава (а), его окончания (б) и продолжительности (в) в Петрозаводской, Кондопожской и Большой губе

Fig. 3. Interannual variability of ice freezing (а), ice breaking (б) and the ice duration (в) in Petrozavodsk, Kondopoga and Bolshaya Guba Bays

Таблица 2. Оценки линейного тренда временных рядов дат начала, окончания и продолжительности ледостава за 1953–2024 и 1976–2024 гг. в заливах Онежского озера

Table 2. Assessment of the linear trend of ice freezing (ice-on) and breaking (ice-off) dates, and the ice duration for the periods 1953–2024 and 1976–2024 in the bays of Lake Onego

Название Name	Ледовый режим Ice regime	1953–2024			1976–2024		
		b	r ²	p	b	r ²	p
Большая губа Bolshaya Guba Bay	Начало ледостава Ice-on	+3,027	0,182	0,0002	+5,085	0,217	0,0008
	Окончание ледостава Ice-off	–1,896	0,255	0,0000	–1,759	0,119	0,0150
	Продолжительность ледостава Ice duration	–4,923	0,261	0,0000	–6,844	0,232	0,0005
Кондопожская губа Kondopoga Bay	Начало ледостава Ice-on	+2,311	0,113	0,0139	+4,551	0,188	0,0018
	Окончание ледостава Ice-off	–2,603	0,385	0,0000	–3,490	0,377	0,0000
	Продолжительность ледостава Ice duration	–4,915	0,259	0,0000	–8,041	0,341	0,0000
Петрозаводская губа Petrozavodsk Bay	Начало ледостава Ice-on	+2,603	0,109	0,0047	+3,797	0,097	0,0297
	Окончание ледостава Ice-off	–2,469	0,253	0,0000	–3,784	0,266	0,0002
	Продолжительность ледостава Ice duration	–5,072	0,216	0,0000	–7,581	0,209	0,0009

Примечание. b – коэффициент линейного тренда (сутки/10 лет), r² – вклад тренда в дисперсию, p – уровень значимости.
Note. b is the linear trend coefficient (days/10 years), r² is the contribution of the trend to the variance, p is the significance level.

для заливов крупного северного озера согласуются с данными 2499 озер Северного полушария, для которых определена скорость сокращения ледостава в среднем на 9 суток за 10 лет за 1971–2020 гг. [Basu et al., 2024].

Для заливов Онежского озера за 70-летний период продолжительность ледостава сократилась на 35 суток, причем более позднее замерзание озер вносило больший вклад в сокращение ледостава по сравнению с более ранним очищением озер ото льда.

Температура поверхности воды

Как показано выше, рост температуры воздуха в осенние, зимние и весенние месяцы приводит к более ранним срокам окончания ледостава и очищения ото льда заливов Онежского озера. Потепление может приводить также к более ранним датам установления прямых термических стратификаций и большей устойчивости водной толщи, что способствует значительному нагреванию эпилимниона в течение летних месяцев [Woolway et al., 2020]. На многолетнюю изменчивость температуры поверхностного слоя воды в первую очередь

влияют межгодовые колебания приземной температуры воздуха. Коэффициенты корреляции среднемесячных значений температуры воздуха и температуры поверхностного слоя воды у берега на гидрологических постах каждого залива за июнь–октябрь в 1953–2024 гг. равны 0,87–0,89.

Поскольку в Повенецком заливе позже сходит лед, весенний термобар в Большой губе проходит в более поздние сроки. Согласно нашим оценкам, переход температуры воды через 4 °С весной на гидрологических постах в базовый период 1991–2020 гг. в среднем наблюдался в Кондопожской губе 7 мая, в Петрозаводской губе – 10 мая, в Большой губе – 18 мая. Заканчивался период прямой термической стратификации в трех заливах в близкие даты: 10 ноября в Петрозаводской губе, 11 ноября в Кондопожской губе и 15 ноября в Большой губе. На рис. 4 (а) представлены графики межгодовой изменчивости продолжительности периода с температурой > 4 °С в заливах за 1953–2024 гг. Линейный тренд составил +2,9 сут/10 лет в Петрозаводской губе, +4,1 сут/10 лет в Кондопожской губе и +2,8 сут/10 лет в Большой губе (p < 0,01).

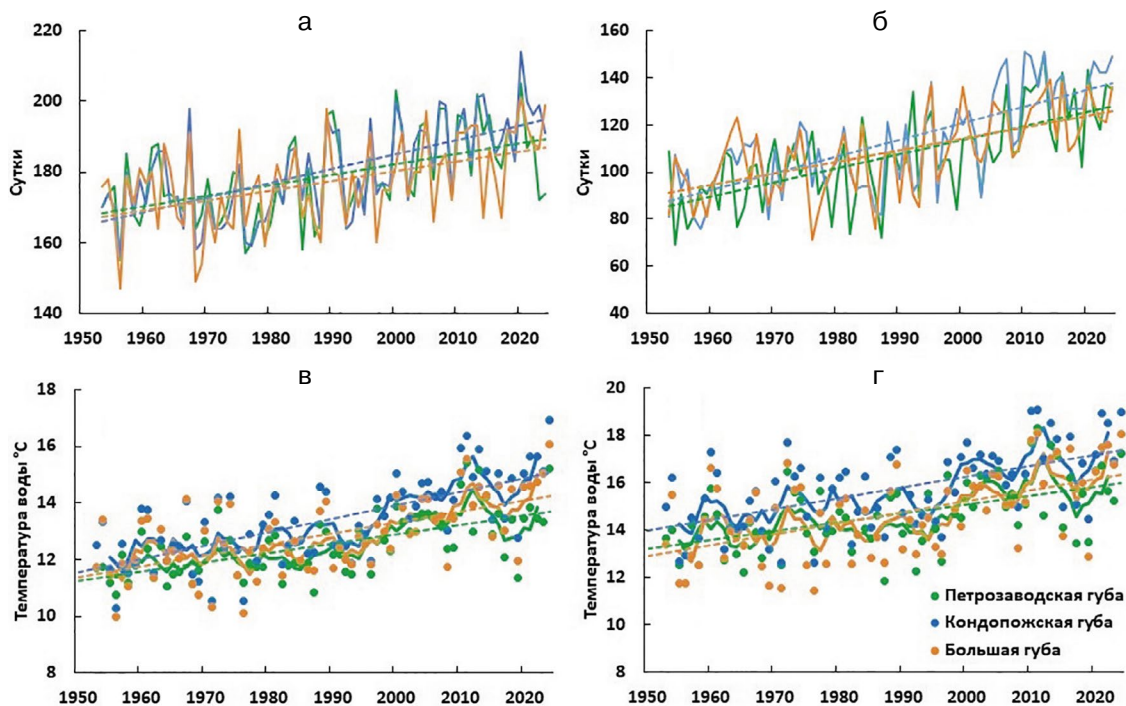


Рис. 4. Продолжительность периода с температурой воды $> 4^{\circ}\text{C}$ (а); продолжительность «биологического лета» (б); средняя температура поверхности воды за июнь–октябрь (в); средняя за июнь–август температура поверхности воды (г) в Петрозаводской, Кондопожской и Большой губе. 5-летние скользящие средние значения температуры воды, прямые линии – линии трендов за период 1953–2024 гг.

Fig. 4. Duration of the period with water temperature $> 4^{\circ}\text{C}$ (a); duration of the 'biological summer' (б); average water surface temperature for June–August (в); average water surface temperature for June–October (г) in Petrozavodsk, Kondopogha and Bolshaya Guba Bays. 5-year moving average water temperatures, straight lines – trend lines for the period 1953–2024

Следовательно, за 70 лет наблюдений продолжительность периода с прямой термической стратификацией в заливах увеличилась на 20–30 суток.

Переход температуры воды через 10°C в 1991–2020 гг. летом наблюдался в среднем 5 июня в Петрозаводской губе, 6 июня в Кондопожской и 11 июня в Большой губе, осенью – 30 сентября в Петрозаводской губе, 8 октября в Кондопожской и 7 октября в Большой губе. Скорость роста продолжительности «биологического лета» (наиболее благоприятный период для развития гидробионтов) составила $+5,9$ сут/10 лет в Петрозаводской губе, $+7,0$ сут/10 лет в Кондопожской и $+4,9$ сут/10 лет в Большой губе (рис. 4, б). Таким образом, за исследуемые годы продолжительность периода с температурой воды $> 10^{\circ}\text{C}$ увеличилась на 30–40 суток ($p < 0,01$). Большие скорости увеличения периодов стратификации и продолжительности «биологического лета» в Кондопожской губе по сравнению с другими заливами Онежского озера обусловлены, скорее всего, мелководностью и большей изолированностью от открытого плеса озера.

На рис. 4 (в, г) приведены данные усредненных с июня по октябрь значений температуры поверхности воды и средние летние значения температуры воды, 5-летние скользящие средние и линейные тренды для трех заливов Онежского озера. Наибольшая температура воды характерна для гидрологического поста в Кондопожской губе. Меньшие значения температуры воды в более южной Петрозаводской губе по сравнению с Кондопожской губой можно объяснить ее большей открытостью и активным водообменом с глубоководной акваторией озера.

Анализ долгосрочных изменений в заливах температуры поверхности воды показал повышение в течение каждого календарного месяца с июня по октябрь (табл. 3). В 1953–2024 гг. скорость повышения средней температуры поверхности воды за июнь–октябрь составила от $0,34^{\circ}\text{C}/10$ лет в Петрозаводской губе до $0,47^{\circ}\text{C}/10$ лет в Кондопожской губе (табл. 3), что привело к ее росту на 2,4–3,2 $^{\circ}\text{C}$ за 70-летний период. За летний сезон (июнь–август) темпы роста температуры составляли от $0,37^{\circ}\text{C}/10$ лет в Петрозаводской губе до $0,46^{\circ}\text{C}/10$ лет в Кондопожской губе.

Таблица 3. Коэффициенты линейного тренда температуры поверхностного слоя воды (°C/10 лет) за отдельные месяцы 1976–2024 гг. и осредненные за июнь–август и июнь–октябрь в период 1953–2024 и 1976–2024 гг. Уровень значимости $p < 0,01$

Table 3. Coefficients of the linear trend of surface water temperature (°C/10 years) for several months of the period 1976–2024 and averaged for June–August and June–October for the periods 1953–2024 and 1976–2024. Significance level is $p < 0.01$

Название Name	VI	VII	VIII	IX	X	VI–VIII		VI–X	
						1953–2024	1976–2024	1953–2024	1976–2024
Большая губа Bolshaya Guba Bay	0,84	0,76	0,65	0,56	0,34	0,45	0,75	0,37	0,63
Кондопожская губа Kondopoga Bay	0,65	0,66	0,65	0,75	0,62	0,46	0,66	0,47	0,67
Петрозаводская губа Petrozavodsk Bay	0,64	0,62	0,32	0,49	0,29	0,37	0,53	0,34	0,47

В 1976–2024 гг. темпы роста температуры поверхности воды были больше, чем в среднем за 70-летний период, и достигали в июне–октябре 0,47–0,67 °C/10 лет, а за летний сезон – 0,53–0,75 °C/10 лет. Наиболее быстрый рост средней температуры поверхностного слоя воды с 1976 года происходил в Большой губе Онежского озера как в летние месяцы, так и в июне–октябре, что можно связать с наибольшей скоростью роста температуры воздуха в этом районе в весенние, летние и осенние месяцы (см. табл. 1).

Температура поверхности воды в результате воздействия климатических факторов повышается в озерах разных регионов мира. В среднем рост температуры поверхностного слоя воды летом в 235 озерах мира за период 1985–2009 гг. происходил со скоростью 0,34 °C/10 лет [O'Reilly et al., 2015]. Однако тенденции потепления поверхностных вод разных озер могут быть весьма изменчивыми. Например, тренд температуры поверхности воды озера Байкал за 1970–2016 гг. варьирует от 0,11 до 0,69 °C/10 лет на 17 станциях в разных районах этого озера, при среднем значении по всем станциям 0,45 °C/10 лет [Шимараев, Троицкая, 2018]. В Рыбинском водохранилище за 1976–2019 гг. выявлена тенденция повышения средней за май–октябрь температуры воды со скоростью 0,72 °C/10 лет [Законнова, 2021]. Для озера Центральной Финляндии Каллавеси средняя скорость потепления в 1964–2020 гг. составила 0,42 °C/10 лет [Noori et al., 2022].

Заключение

Проведенный анализ данных наблюдений приземной температуры воздуха трех метеостанций Карелии за 1953–2024 гг. позволяет сделать вывод о сохраняющемся устойчивом

потеплении регионального климата на побережье Онежского озера во все сезоны года, с наиболее выраженным потеплением в зимний сезон. В результате за 70-летний период продолжительность ледостава в заливах Онежского озера сократилась на 35 суток. Средняя температура поверхности воды за июнь–октябрь в заливах увеличилась на 2,4–3,2 °C. Продолжительность периода с температурой воды > 4 °C увеличилась на 20–30 суток, а продолжительность периода с температурой > 10 °C – на 30–40 суток.

Анализ данных наблюдений на гидрологических постах показал, что различия в ледовой фенологии, продолжительности летней стратификации, «биологического лета» и температуре поверхности воды в губах обусловлены не только зональными факторами, но и морфометрическими особенностями заливов и расположением постов наблюдений. Пост наблюдений в Кондопожской губе находится в ее вершине в мелководном месте, что может быть причиной более раннего начала ледостава и наибольшей его продолжительности по сравнению с другими заливами. Также для Кондопожской губы отмечены наиболее высокие значения температуры поверхности воды и наибольшая продолжительность «биологического лета», что может быть связано как с расположением гидрологического поста, так и с особенностями водообмена этого залива с открытым плесом озера.

Отличительная черта Петрозаводской губы – активный водообмен с центральным плесом Онежского озера; в ней наблюдается самое позднее начало ледостава и наименьшая его продолжительность. Большая губа Повенецкого залива – самый северный залив с наибольшими глубинами. Ледостав в ней начинается на несколько суток раньше, чем в Петрозаводской губе, а заканчивается примерно на неделю позже.

Несмотря на существенные морфометрические различия этих заливов, в них отмечаются близкие значения температуры поверхности воды и продолжительности «биологического лета».

Литература

Гидрометцентр России [Электронный ресурс]. URL: <https://meteoinfo.ru/climatecities> (дата обращения: 21.04.2026).

Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. 255 с.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2025 год. м., 2026. 129 с.

Ефремова Т. В., Белашев Б. З., Пальшин Н. И., Здоровеннова Г. Э., Богданов С. Р., Здоровеннов Р. Э. Ледовая фенология разнотипных озер Карелии по данным многолетних наблюдений (1950–2021) // Лед и Снег. 2026. Т. 66, № 1. С. 105–120. doi: 10.7868/S2412376526010087

Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Белашев Б. З. Температура воды разнотипных озер Карелии в условиях изменения климата (по данным инструментальных измерений 1953–2011 гг.) // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, № 2. С. 228–238. doi: 10.7868/S0321059616020024

Ефремова Т. В., Пальшин Н. И. Оценка водообмена Петрозаводской губы с Онежским озером // Исследование водных ресурсов Карелии / Ред. В. А. Фрейндлинг. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1989. С. 21–25.

Ефремова Т. В., Пальшин Н. И. Сроки ледовых явлений на водоемах Северо-Запада России // Метеорология и гидрология. 2011. Т. 36, № 8. С. 89–98.

Законнова А. В. Климатические изменения термического режима Рыбинского водохранилища // Труды Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН. 2021. № 94(97). С. 7–16. doi: 10.47021/0320-3557-2021-94-7-16

Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Назарова Л. Е., Баклагин В. Н., Здоровеннов Р. Э., Смирнова В. С. Реакция экосистемы Онежского озера в весенне-летний период на аномально высокую температуру воздуха зимы 2019/2020 годов // Известия РАН. Серия географическая. 2021. Т. 85, № 6. С. 888–899. doi: 10.31857/S2587556621060078

Крупнейшие озера-водохранилища северо-запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 375 с.

Ресурсы поверхностных вод. Карелия и Северо-Запад / Сост. В. Ф. Гашева и др.; под ред. В. Е. Водогрецкого. Л.: Гидрометеиздат, 1972. Т. 2. Ч. 1. 525 с.

Шимараев М. Н., Троицкая Е. С. Тенденции изменения температуры верхнего слоя воды на прибрежных участках Байкала в современный период // География и природные ресурсы. 2018.

№ 4. С. 95–104. doi: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-4 (95–104)

Basu A., Culpepper J., Blagrove K., Sharma S. Phenological shifts in lake ice cover across the Northern hemisphere: a glimpse into the past, present, and the future of lake ice phenology // Water Resour. Res. 2024. Vol. 60. e2023WR036392. doi: 10.1029/2023WR036392

Benson B. J., Magnuson J. J., Jensen O. P., Card V. M., Hodgkins G., Korhonen J., Livingstone D. M., Stewart K. M., Weyhenmeyer G. A., Granin N. G. Extreme events, trends, and variability in Northern Hemisphere lake-ice phenology (1855–2005) // Clim. Change. 2012. Vol. 112. P. 299–323. doi: 10.1007/s10584-011-0212-8

Filatov N., Baklagin V., Efremova T., Nazarova L., Palshin N. Climate change impact on the watersheds of lakes Onego and Ladoga from remote sensing and in situ data // Inland Waters. 2019. Vol. 9, no. 2. P. 130–141. doi: 10.1080/20442041.2018.1533355

Magnuson J. J., Robertson D. M., Benson B. J., Wynne R. H., Livingstone D. M., Arai T., Assel R. A., Barry R. G., Card V., Kuusisto E., Granin N. G., Prowse T. D., Stewart K. M., Vuglinski V. S. Historical trends in lake and river ice cover in the northern hemisphere // Science. 2000. Vol. 289. P. 1743–1746. doi: 10.1126/science.289.5485.1743

Noori R., Bateni S. M., Saari M., Almazroui M., Torabi Haghighi A. Strong warming rates in the surface and bottom layers of a boreal lake: results from approximately six decades of measurements (1964–2020) // Earth and Space Science. 2022. Vol. 9(2). e2021EA001973. doi: 10.1029/2021EA001973

O'Reilly C. M., Sharma S., Gray D. K. et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe // Geophys. Res. Lett. 2015. Vol. 42, no. 24. P. 10773–10781. doi: 10.1002/2015GL066235

Schneider P., Hook S. J. Space observations of inland water bodies show rapid surface warming since 1985 // Geophys. Res. Lett. 2010. Vol. 37, no. 22. P. 208–217. doi: 10.1029/2010GL045059

Sharma S., Richardson D. C., Woolway R. I., Imrit M. A., Bouffard D., Blagrove K., Daly J., Filazzola A., Granin N., Korhonen J., Magnuson J., Marszelewski W., Matsuzaki S. S., Perry W., Robertson D. M., Rudstam L. G., Weyhenmeyer G. A., Yao H. Loss of ice cover, shifting phenology, and more extreme events in Northern Hemisphere lakes // Jour. Geophys. Res. Biogeosci. 2021. Vol. 126. e2021JG006348. doi: 10.1029/2021JG006348

Woolway R. I., Kraemer B. M., Lenters J. D., Merchant C. J., O'Reilly C. M., Sharma S. Global lake responses to climate change // Nat. Rev. Earth Environ. 2020. Vol. 1, no. 8. P. 388–403. doi: 10.1038/s43017-020-0067-5

Woolway R. I., Merchant C. J. Amplified surface temperature response of cold, deep lakes to inter-annual air temperature variability // Sci. Rep. 2017. Vol. 7, no. 1. P. 1–8. doi: 10.1038/s41598-017-04058-0

Woolway R. I., Merchant C. J. Intralake heterogeneity of thermal responses to climate change: a study of large northern hemisphere lakes. J. Geophys. Res. Atmos. 2018. Vol. 123. P. 3087–3098. doi: 10.1002/2017JD027661

References

A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2025. Moscow; 2026. 129 p. (In Russ.)

Basu A., Culpepper J., Blagrove K., Sharma S. Phenological shifts in lake ice cover across the Northern hemisphere: a glimpse into the past, present, and the future of lake ice phenology. *Water Resour. Res.* 2024;60:e2023WR036392. doi: 10.1029/2023WR036392

Benson B. J., Magnuson J. J., Jensen O. P., Card V. M., Hodgkins G., Korhonen J., Livingstone D. M., Stewart K. M., Weyhenmeyer G. A., Granin N. G. Extreme events, trends, and variability in Northern Hemisphere lake-ice phenology (1855–2005). *Clim. Change.* 2012;112:299–323. doi: 10.1007/s10584-011-0212-8

Efremova T. V., Belashev B. Z., Pal'shin N. I., Zdorovenova G. E., Bogdanov S. R., Zdorovenov R. E. Ice phenology of different types of lakes in Karelia based on long-term observation data (1950–2021). *Led i Sneg = Ice and Snow.* 2026;66(1):105–120. (In Russ.). doi: 10.7868/S2412376526010087

Efremova T. V., Pal'shin N. I. Assessment of water exchange between Petrozavodsk Bay and Lake Onego. *Issledovanie vodnykh resursov Karelii = Study of water resources of Karelia.* Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR; 1989. P. 21–25. (In Russ.)

Efremova T. V., Pal'shin N. I. Ice phenomena term on the water bodies of Northwestern Russia. *Meteorology and Hydrology.* 2011;36(8):559–565. doi: 10.3103/S1068373911080085

Efremova T. V., Pal'shin N. I., Belashev B. Z. Water temperature in different types of lakes in Karelia under changing climate based on data of instrumental measurements in 1953–2011. *Water Resources.* 2016;43(2):402–411. doi: 10.1134/S0097807816020020

Filatov N. N. (ed.). Diagnosis and forecast of thermohydrodynamics and ecosystems of the great lakes of Russia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2020. 255 p. (In Russ.)

Filatov N. N. (ed.). The largest reservoir lakes of the Northwest of European Russia: current state and ecosystem changes under climate and anthropogenic impact. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. 375 p. (In Russ.)

Filatov N., Baklagin V., Efremova T., Nazarova L., Pal'shin N. Climate change impact on the watersheds of Lakes Onego and Ladoga from remote sensing and in situ data. *Inland Waters.* 2019;9(2):130–141. doi: 10.1080/20442041.2018.1533355

Gasheva V. F. et al. (comp.). Surface water resources. Karelia and the North-West. Vol. 2, pt. 1. Leningrad: Hydrometeoizdat; 1972. 525 p. (In Russ.)

Hydrometeorological Center of Russia. (In Russ.). URL: <https://meteoinfo.ru/climatecities> (accessed: 21.04.2026).

Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Efremova T. V., Pal'shin N. I., Nazarova L. E., Baklagin V. N., Zdorovenov R. E., Smirnova V. S. Response of the Lake Onego

ecosystem to abnormally high air temperatures in the winter of 2019/2020 in the spring-summer period. *Izvestiya RAN. Ser. geogr. = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Ser.* 2021;85(6):888–899. (In Russ.). doi: 10.31857/S2587556621060078

Magnuson J. J., Robertson D. M., Benson B. J., Wynne R. H., Livingstone D. M., Arai T., Assel R. A., Barry R. G., Card V., Kuusisto E., Granin N. G., Prowse T. D., Stewart K. M., Vuglinski V. S. Historical trends in lake and river ice cover in the northern hemisphere. *Science.* 2000;289:1743–1746. doi: 10.1126/science.289.5485.1743

Noori R., Bateni S. M., Saari M., Almazroui M., Torabi Haghighi A. Strong warming rates in the surface and bottom layers of a boreal lake: results from approximately six decades of measurements (1964–2020). *Earth and Space Science.* 2022;9(2):e2021EA001973. doi: 10.1029/2021EA001973

O'Reilly C. M., Sharma S., Gray D. K. et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Geophys. Res. Lett.* 2015;42(24):10773–10781. doi: 10.1002/2015GL066235

Schneider P., Hook S. J. Space observations of inland water bodies show rapid surface warming since 1985. *Geophys. Res. Lett.* 2010;37(22):208–217. doi: 10.1029/2010GL045059

Sharma S., Richardson D. C., Woolway R. I., Imrit M. A., Bouffard D., Blagrove K., Daly J., Filazzola A., Granin N., Korhonen J., Magnuson J., Marszelewski W., Matsuzaki S. S., Perry W., Robertson D. M., Rudstam L. G., Weyhenmeyer G. A., Yao H. Loss of ice cover, shifting phenology, and more extreme events in Northern Hemisphere lakes. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2021;126:e2021JG006348. doi: 10.1029/2021JG006348

Shimaraev M. N., Troitskaya E. S. Current trends in upper water layer temperature in coastal zones of Baikal. *Geography and Natural Resources.* 2018;39(4):349–357. doi: 10.1134/S187537281804008X

Woolway R. I., Kraemer B. M., Lenters J. D., Merchant C. J., O'Reilly C. M., Sharma S. Global lake responses to climate change. *Nat. Rev. Earth Environ.* 2020;1(8):388–403. doi: 10.1038/s43017-020-0067-5

Woolway R. I., Merchant C. J. Amplified surface temperature response of cold, deep lakes to inter-annual air temperature variability. *Sci. Rep.* 2017;7(1):1–8. doi: 10.1038/s41598-017-04058-0

Woolway R. I., Merchant C. J. Intralake heterogeneity of thermal responses to climate change: a study of large northern hemisphere lakes. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2018;123:3087–3098. doi: 10.1002/2017JD027661

Zakonova A. V. Climatic changes in the thermal regime of the Rybinsk Reservoir. *Trudy Instituta biologii vnutrennikh vod im. I. D. Papanina RAN = Proceedings of the I. D. Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences.* 2021;94(97):7–16. (In Russ.). doi: 10.47021/0320-3557-2021-94-7-16

Поступила в редакцию / received: 29.04.2026; принята к публикации / accepted: 17.08.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Ефремова Татьяна Владимировна

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: efremova@nwpi.krc.karelia.ru

Кравченкова Татьяна Георгиевна

начальник Карельского ЦГМС

e-mail: gidromet@onego.ru

Пальшин Николай Иннокентьевич

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: npalshin@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Efremova, Tatiana

Cand. Sci. (Geog.), Senior Researcher

Kravchenkova, Tatyana

Head of the Karelian Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring

Palshin, Nikolai

Cand. Sci. (Geog.), Senior Researcher