

УДК 556:555

ТЕРМИЧЕСКИЙ И ЛЕДОВЫЙ РЕЖИМ ПЕТРОЗАВОДСКОЙ ГУБЫ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА В 2023–2024 ГОДАХ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ НА АВТОНОМНОЙ СТАНЦИИ

Г. Э. Здоровеннова*, Р. Э. Здоровеннов, Ю. С. Новикова,
Т. В. Ефремова

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030),
*zdorovennova@gmail.com

По данным измерений температуры воды на автономной станции в центральной глубоководной части Петрозаводской губы Онежского озера в 2023–2024 гг. определены даты установления и взлома льда, продолжительность ледостава, весеннего и осеннего перемешивания, летней стратификации. Выявлены отклонения этапов годового термического цикла от среднеемноголетних значений: установление льда в более ранние сроки на фоне холодных осенних месяцев, взлом льда в более ранние сроки на фоне теплых весенних месяцев, прохождение весеннего термобара на 10–15 дней раньше типичных сроков, продолжительность летней стратификации на месяц дольше. На фоне аномально теплых погодных условий августа и сентября в эти годы (среднемесячная температура воздуха в августе была выше климатической нормы 1991–2020 гг. на 1,7 °С, в сентябре – на 4,0 и 5,3 °С соответственно) биологическое лето продолжалось на 2–3 недели дольше нормы. Летом 2023 и 2024 годов в районе измерительной станции наблюдались повторяющиеся эпизоды резкого увеличения температуры придонного слоя воды с последующим возвратом к фоновым значениям. Опускание теплой воды из поверхностного слоя могло происходить при конвергенции течений. Периоды с аномально высокой температурой придонной воды (на 5–10 °С выше типичных значений) летом 2024 г. продолжались более 1,5 мес., что могло оказать негативное воздействие на среду обитания бентосного сообщества, адаптированного к более холодным условиям. Выявленные изменения термического и ледового режимов озера могут отразиться на функционировании экосистемы озера, что требует организации мониторинговых наблюдений.

Ключевые слова: Онежское озеро; термический режим; ледовый режим; температура воды; стратификация; перемешивание

Для цитирования: Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э., Новикова Ю. С., Ефремова Т. В. Термический и ледовый режим Петрозаводской губы Онежского озера в 2023–2024 годах по данным измерений на автономной станции // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 6. С. 27–38. doi: 10.17076/lim2114

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН).

G. E. Zdorovenнова*, R. E. Zdorovenнов, I. S. Novikova, T. V. Efremova.
THERMAL AND ICE REGIMES IN PETROZAVODSK BAY OF LAKE ONEGO IN
2023–2024 BASED ON DATA OF MEASUREMENTS AT AN AUTONOMOUS
STATION

*Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *zdorovennova@gmail.com*

The ice-on and ice-off dates, the duration of the ice-covered period, spring and autumn mixing, and summer stratification were determined based on water temperature measurements at an autonomous station in the central deep-water part of Petrozavodsk Bay of Lake Onego in 2023–2024. Deviations were revealed in the stages of the annual thermal cycle from the average long-term values: ice-on occurred earlier in the cold autumn months, ice break-up happened earlier in the warm spring months, the spring thermal bar passed 10–15 days earlier than historically, and the duration of summer stratification was a month longer. Due to the abnormally warm weather in August and September in these years (the average monthly air temperature in August of both years was 1.7 °C higher than the 1991–2020 baseline, and in September 2023 and 2024 it was 4.0 and 5.3 °C higher, respectively), the biological summer lasted 2–3 weeks longer than normally. In the summer of 2023 and 2024, repeated episodes of a sharp rise in the temperature of the bottom water layer with a subsequent return to the background values were observed at the measuring station. The descent of warm water from the surface layer could occur during the convergence of currents. Periods with abnormally high bottom water temperatures (5–10 °C higher than typical values) in the summer of 2024 lasted for more than 1.5 months, which could have a negative impact on the benthic community adapted to colder conditions. The identified changes in the thermal and ice regimes of the lake may affect the functioning of the lake ecosystem, which requires monitoring arrangements to be made for the future.

Keywords: Lake Onego; thermal regime; ice regime; water temperature; stratification; mixing

For citation: Zdorovenнова G. E., Zdorovenнов R. E., Novikova I. S., Efremova T. V. Thermal and ice regimes in Petrozavodsk Bay of Lake Onego in 2023–2024 based on data of measurements at an autonomous station. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 6. P. 27–38. doi: 10.17076/lim2114

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

Введение

Реакция термического и ледового режимов озер на климатическую изменчивость наиболее заметно проявляется в средних и высоких широтах [IPCC..., 2021]. В результате изменения погодных условий повышается температура верхнего слоя воды в озерах, усиливается стратификация, меняется режим перемешивания, сокращается период ледостава, уменьшается толщина ледяного покрова и меняется его структура [O'Reilly et al., 2015; Sharma et al., 2019; Woolway et al., 2019, 2020; Weyhenmeyer et al., 2022; Naderian et al., 2025]. Такие изменения представляют опасность для чувствительных экосистем северных озер, резко нарушая привычные для гидробионтов температурные, световые, гидродинамические условия среды обитания и сложившиеся пищевые цепочки [Hampton et al.,

2017, 2024; Jansen et al., 2021]. В частности, могут измениться фенологические фазы развития фитопланктона и зоопланктона [Winder, Schindler, 2004; Thackeray et al., 2008]. Кроме того, при изменении температуры воды и режима перемешивания меняются скорости химических реакций в водной толще и верхнем слое донных отложений озер [Gudas et al., 2010], что может оказывать влияние на кислородный режим, концентрации биогенных веществ и объемы эмиссии парниковых газов [Zhou et al., 2025]. Эти факторы определяют актуальность изучения изменений термического, гидродинамического и ледового режимов озер на фоне изменчивости климата.

Онежское озеро – одно из крупнейших озер Европы, уникальный водоем со сложным термодинамическим режимом. Региональная изменчивость климата южной части Карелии, выражающаяся в повышении температуры

воздуха во все сезоны года, изменении облачности и режима осадков [Назарова, 2023; Ефремова и др., 2024], обусловила изменения ледового и термического режимов этого глубоководного северного озера за последние несколько десятилетий [Крупнейшие..., 2015; Filatov et al., 2019], что, в свою очередь, оказывает влияние на условия обитания гидробионтов [Калинкина и др., 2021] и может отрицательно сказаться на качестве воды.

Наряду с измерениями температуры воды поверхностного слоя Онежского озера, которые проводятся на прибрежных гидрологических постах, важной задачей является организация измерений в глубоководных районах этого озера для выявления изменений режима перемешивания в связи с меняющимися погодными условиями. Такие измерения проводятся в Петрозаводской губе силами сотрудников Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН. В центральной глубоководной части губы установлена автономная станция, которая представляет собой заякоренную косу с температурными датчиками RBR (точность 0,002 °C). Измерения проводятся с дискретностью в одну минуту. В 2015–2017 гг. измерения на термокосе проводились в весенние месяцы в рамках международного проекта «Life under ice», датчики были распределены от нижней поверхности льда до глубин 23,0–27,5 м; количество датчиков в разные годы изменялось от 16 до 69 шт., расстояние между датчиками составляло 0,3–2,0 м [Bogdanov et al., 2019]. Начиная с октября 2019 г. до настоящего времени измерения проводятся в кругло-

годовом режиме датчиками, распределенными по водному столбу в диапазоне глубин от 3–4 до 19 м; количество датчиков в разные периоды измерений составляло 13–16 шт. Датчики распределены по вертикали так, что часть из них попадает в верхний перемешанный слой, часть – в слой скачка, часть – в придонный стратифицированный слой. Анализ данных термокосы за 2019–2022 гг. позволил установить выраженную межгодовую изменчивость дат начала и продолжительности этапов годового термического цикла, вызванную погодными условиями [Здоровеннова и др., 2023]. В настоящей статье проанализированы данные измерений термокосы в период с октября 2022 г. по ноябрь 2024 г., проведено сравнение со среднемноголетними значениями [Крупнейшие..., 2015], а также с данными измерений на термокосе в 2019–2022 гг.

Цель работы – уточнение сроков основных гидрологических явлений на акватории Петрозаводской губы Онежского озера и выявление термогидродинамических особенностей по данным измерений температуры на автономной станции в период с октября 2022 г. по ноябрь 2024 г.

Материалы и методы

Петрозаводская губа – один из заливов Онежского озера, акватория которого протянулась с северо-запада на юго-восток (рис. 1). Это достаточно глубокий залив с глубинами до 30 м, на выходе из губы глубины уменьшаются до 20–23 м. Ивановские острова отделяют губу от залива Большое Онего. Основным притоком губы является р. Шуя.

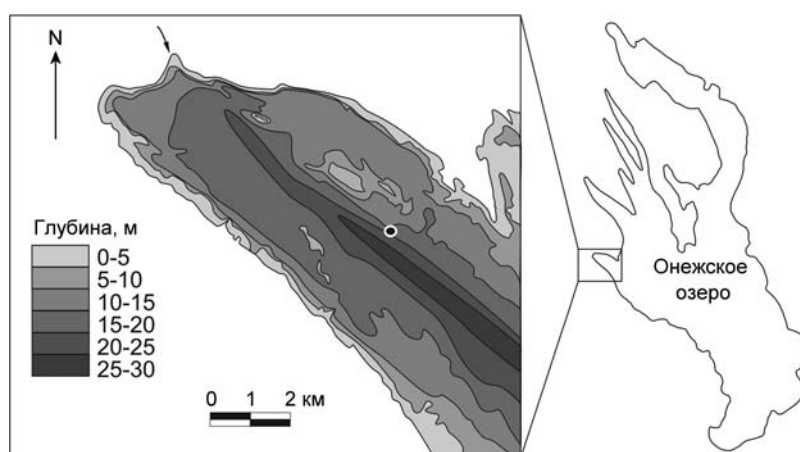


Рис. 1. Положение автономной станции (обозначено кружком) в центральной части Петрозаводской губы с октября 2022 по ноябрь 2024 г. Стрелкой показано место впадения р. Шуя

Fig. 1. Position of the autonomous station (circle) in the center of Petrozavodsk Bay from October 2022 to November 2024. The arrow shows the confluence of the Shuya River

Автономная станция установлена в центральной глубоководной части Петрозаводской губы на глубине 19,5 м (рис. 1). В таблице 1 приведены глубины датчиков и периоды измерений на термокосе.

По данным термокосы определены даты начала и окончания ледостава, продолжительность весеннего подледного прогрева и подледной радиационной конвекции, дата прохождения термобара весной, продолжительность стратификации, периода осеннего перемешивания, предледоставного периода, а также «биологического» лета, когда температура воды верхнего датчика термокосы (глубина 3–4 м) превышала 10 °С.

Начало ледостава определяли по следующим признакам: (1) исчезновение высокочастотных (минутных) колебаний температуры, которые присутствуют в записях верхних датчиков косы как проявление ветро-волнового перемешивания в условиях открытой воды, а также (2) устойчивое повышение температуры придонного слоя воды при продолжающемся понижении температуры верхнего. Начало периода весеннего подледного прогрева определяли по устойчивому повышению температуры воды на верхнем датчике термокосы. Дату взлома льда определяли по появлению высокочастотных (минутных) колебаний в записях верхних датчиков термокосы (проявление ветро-волнового перемешивания), а также по появлению резкого однократного скачка температуры в записях всех датчиков, который характерен для периода разрушения льда и обусловлен полным перемешиванием водного столба. Продолжительность весеннего перемешивания в условиях открытой воды

определяли от даты взлома льда до даты установления стратификации, которую, в свою очередь, определяли по превышению разницы 1 °С температуры по столбу воды между верхним и нижним датчиками для диапазона температур выше 4 °С. Дату прохождения весеннего термобара определяли по переходу температуры воды через 4 °С в сторону повышения. Продолжительность осеннего перемешивания определяли от даты окончания стратификации до даты перехода температуры воды через 4 °С в сторону понижения. Продолжительность предледоставного периода определяли от даты перехода температуры воды через 4 °С в сторону понижения до установления льда. Наряду с этим изучены некоторые особенности изменения температуры воды Петрозаводской губы в период ледостава и летней стратификации.

Погодные условия района исследований охарактеризованы по данным метеостанции Петрозаводск [Расписание..., 2025]. Проанализированы следующие параметры: средняя температура воздуха за каждый месяц года в период 2015–2024 гг., когда проводились измерения на автономной станции, и ее отклонения от климатической нормы 1991–2020 гг. Ранее был проведен анализ погодных условий 2015–2022 гг. в сравнении с климатической нормой 1961–1990 гг. [Здоровеннова и др., 2023]. Но поскольку решением Всемирной метеорологической организации изменен базовый период для расчета климатических норм, с 2022 г. подведомственные учреждения Росгидромета переходят на использование в оперативно-производственной практике климатических норм, рассчитанных за период 1991–2020 гг. [Доклад..., 2023].

Таблица 1. Периоды и глубины измерений температуры воды на автономной станции в центральной части Петрозаводской губы Онежского озера с октября 2022 по ноябрь 2024 г.

Table 1. Periods and depths of water temperature measurements on the autonomous station in the center of Petrozavodsk Bay of Lake Onego from October 2022 to November 2024

Период измерений Period of measurements	Количество датчиков, глубины измерений, м Number of sensors, depths of measurements, m
21 октября 2022 г. – 14 мая 2023 г. October 21, 2022 – May 14, 2023	16, от 3 до 18 м через 1 м 16, from 3 to 18 m, every 1 m
14 мая – 5 октября 2023 г. May 14 – October 5, 2023	16, от 4 до 19 м через 1 м 16, from 4 to 19 m, every 1 m
5 октября 2023 г. – 22 июня 2024 г. October 5, 2023 – June 22, 2024	15, от 4 до 12 и от 14 до 19 м через 1 м 15, from 4 to 12 and from 14 to 19 m, every 1 m
22 июня – 7 ноября 2024 г. June 22 – November 7, 2024	13, от 4 до 12 м через 1 м, далее на глубинах 14, 16, 17, 19 м 13, from 4 to 12 m, every 1 m, then at depths of 14, 16, 17, 19 m
7 ноября 2024 г. – май 2025 г. November 7 – May 2025	13, от 4 до 12 м через 1 м, далее на глубинах 14, 16, 17, 19 м 13, from 4 to 12 m, every 1 m, then at depths of 14, 16, 17, 19 m

Результаты и обсуждение

Климатическая изменчивость Южной Карелии

В таблице 2 приведены значения средне-месячной температуры воздуха по МС Петрозаводск за базовые периоды 1961–1990 (БП1) и 1991–2020 (БП2) годов. Сравнение двух базовых периодов показывает, что за 30 лет произошло увеличение температуры воздуха во все месяцы года. Наибольшие положительные отклонения отмечены в зимние месяцы: температура декабря, января и февраля стала выше на 1,9, 3,0 и 1,6 °С соответственно. Наименьшее увеличение температуры воздуха (+0,5...+0,6 °С) произошло в мае, июне, октябре и ноябре, в остальные месяцы года рост температуры составил 0,9–1,2 °С.

В таблице 2 также приведены отклонения среднемесячной температуры воздуха в 2015–2024 гг. от этого показателя базового периода 1991–2020 гг. Чаще всего температура воздуха теплее нормы была в марте и ноябре (8 лет из 10); в феврале, мае, июне, августе и декабре также преобладали положительные отклонения от нормы (7 лет из 10). В апреле, июле и октябре повторяемость условий теплее и холоднее нормы была одинаковой (по пять лет).

По абсолютной величине отклонений от нормы в межгодовом аспекте наиболее изменчивые погодные условия были характерны для месяцев зимнего сезона с декабря по март, а также в июне и сентябре (отклонения от нормы как положительные, так и отрицательные, более чем на 4–6 °С в отдельные годы). В мае, июле, августе и ноябре погода была менее изменчива – отклонения от нормы не превышали 4 °С в разные годы. Наиболее стабильные погодные условия были в апреле и октябре (отклонения среднемесячной температуры воздуха от нормы не превышали 2 °С).

Погодные условия середины и конца осени 2022 г., зимнего сезона 2022–2023 гг. и весны 2023 г., когда температура воздуха превышала норму на 0,3–3,4 °С, были существенно теплее того же периода осени 2023 г., зимы 2023–2024 гг. и весны 2024 г. с температурой ниже нормы на 0,2–4,0 °С (табл. 2). Исключение составил теплый март 2024 г. с превышением нормы на 3,0 °С. Начало и середина лета в 2023 г. были заметно холоднее, чем в следующем 2024 г., а конец лета и начало осени в оба года были теплее нормы, с особенно теплыми условиями в сентябре (превышение нормы 1991–2020 гг. на 4,0–5,3 °С). В аномально теплом сентябре 2024 г. (среднемесячная температура 15,3 °С) более чем на градус превышен температурный

Таблица 2. Температура воздуха по месяцам (I–XII) в базовые периоды 1961–1990 (БП1) и 1991–2020 (БП2) годов, изменение температуры между базовыми периодами (БП2–БП1), а также отклонения среднемесячной температуры воздуха в 2015–2024 гг. от второго базового периода 1991–2020 гг. по МС Петрозаводск

Table 2. Air temperature by months of the year (I–XII) during the base periods 1961–1990 (BP1) and 1991–2020 (BP2), temperature change between the base periods (BP2–BP1), as well as deviations of average monthly air temperature in 2015–2024 from the second base period 1991–2020 according to the Petrozavodsk WS

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1961–1991	–11,4	–9,8	–4,4	1,5	8,4	13,5	16,1	14	8,8	3,3	–2,5	–7,6
1991–2020	–8,4	–8,2	–3,5	2,5	8,9	14,1	17,1	15	10	3,8	–1,9	–5,7
БП2–БП1	3	1,6	0,9	1	0,5	0,6	1	1	1,2	0,5	0,6	1,9
2015	1,3	5,5	4,2	–0,3	1,5	0,1	–2,8	0,5	1,8	–0,3	2,0	4,0
2016	–6,5	5,9	2,3	1,0	3,8	0,1	1,4	0,3	0,0	–1,0	–2,4	1,3
2017	1,1	0,7	2,5	–2,3	–3,9	–2,4	–1,6	0,9	–0,2	–0,6	1,7	3,8
2018	3,0	–2,9	–4,7	0,6	3,6	–0,6	1,5	1,9	1,4	1,0	2,2	–0,7
2019	–0,5	4,3	1,8	1,5	0,2	2,4	–3,6	–1,6	–0,4	–1,0	0,7	4,5
2020	6,4	5,5	3,4	–1,0	–1,6	2,0	–0,9	–0,4	1,3	2,1	3,4	1,9
2021	–0,7	–6,2	–0,1	0,8	0,6	5,1	2,9	–0,3	–2,3	2,1	1,3	–4,2
2022	0,3	3,7	1,2	–0,8	–1,6	1,2	1,7	3,3	–1,8	1,5	0,0	0,3
2023	3,4	2,3	0,8	0,8	1,7	–0,3	–1,6	1,7	4,0	–1,7	–1,6	–2,8
2024	–4,0	–0,2	3,0	–0,2	0,4	2,9	1,4	1,7	5,3	1,8	2,1	1,6

Примечание. Жирным выделены максимальные значения положительных и отрицательных отклонений в каждом месяце.

Note. The maximum values of positive and negative deviations in each month are given in bold.

рекорд 2023 г. (табл. 2). Стоит отметить, что все месяцы с мая по декабрь 2024 г. были теплее нормы 1991–2020 гг., при этом летние месяцы со среднемесячной температурой 17,0, 18,5, 16,7 °С были теплее нормы на 1,4–2,9 °С.

Таким образом, погодные условия в 2023 и 2024 гг. существенно отличались как от климатической нормы 1991–2020 гг., так и между собой, что обусловило выраженные расхождения в ледовой фенологии, а также в датах и продолжительности основных гидрологических явлений.

Ледовая фенология и этапы годового термического цикла

По данным термокосы установлено, что осенью 2022, 2023 и 2024 гг. водная масса Петрозаводской губы охлаждалась в хорошо перемешанном состоянии, близком к гомотермии. Переход температуры воды через 4 °С в сторону понижения осенью 2022 г. произошел 20 ноября, осенью 2023 г. – 13 ноября (табл. 3). Осенью 2024 г. эту дату установить не удалось, так как на момент поднятия термокосы из озера (7 ноября 2024 г.) температура воды была все еще выше 4 °С; начало предледоставного периода для осени 2024 г. будет определено при следующем извлечении термокосы для снятия данных в 2025 г. Продолжительность предледоставного периода осенью 2022 г. составила 26 суток, осенью 2023 г. – 18 суток, что близко к показателям 2021 г., когда этот период продолжался 15 суток. Наиболее длительным

(83 сут.) предледоставный период был в зимние сезоны 2019/20 гг. (83 сут.), и 2020/21 гг. (43 сут.), когда переход температуры воды через 4 °С в сторону понижения происходил в первой и третьей декадах ноября, а лед установился в начале-конце января следующего года.

В зимний сезон 2022/23 гг. лед установился 16 декабря, что близко к среднемноголетним срокам (18 декабря) [Крупнейшие..., 2015], взлом льда происходил 29 апреля 2023 г., на 10 суток раньше среднемноголетних сроков (9 мая) (табл. 3). Продолжительность ледостава в зимний сезон 2022/23 гг. составила 133 сут., что меньше среднемноголетних значений (144 сут.).

В зимний сезон 2023/24 гг. на фоне холодной погоды октября и ноября лед установился необычно рано – 1 декабря, почти на три недели раньше среднемноголетних сроков. Освобождение акватории ото льда 27–28 апреля 2024 г. произошло также раньше среднемноголетних сроков почти на 2 недели. В этот зимний сезон ледостав продлился 149 суток, что больше среднемноголетней продолжительности за счет более раннего установления льда. В зимние сезоны 2019/20 и 2020/21 ледостав продолжался 51 и 97 сут., что существенно меньше среднемноголетних значений как за счет более позднего установления льда, так и за счет более раннего его взлома. В зимний сезон 2021/22 ледостав продолжался 153 сут., что больше среднемноголетних значений, за счет более раннего установления льда.

Таблица 3. Даты начала и окончания и продолжительность в сутках весенней гомотермии, весеннего термобара, стратификации, биологического лета, осенней гомотермии, предледоставного периода в 2022–2024 гг.

Table 3. Start and end dates and duration in days of spring homothermy, spring thermal bar, stratification, biological summer, autumn homothermy, pre-ice period in 2022–2024

Год Year	Весенняя гомотермия Spring homothermy	Весенний термобар Spring thermal bar	Стратификация Stratification	Биологическое лето Biological summer	Осенняя гомотермия Autumn homothermy	Предледоставный период Pre-ice period
2019	н/д no data	н/д no data	н/д no data	н/д no data	н/д no data	9.11.2019– 31.01.2020, 83 сут. / days
2020	23.03–22.05, 60 сут. / days	5–7.05, 3 сут. / days	23.05–4.09, 104 сут. / days	27.05–16.10, 142 сут. / days	5.09–30.11, 55 сут. / days	30.11.2020– 11.01.2021, 43 сут. / days
2021	20.04–11.05, 22 сут. / days	11.05, 1 сут. / day	12.05–26.08, 106 сут. / days	17.05–6.10, 142 сут. / days	27.08–22.11, 87 сут. / days	22.11–7.12, 15 сут. / days
2022	3.05–26.05, 23 сут. / days	13–19.05, 6 сут. / days	27.05–31.08, 96 сут. / days	2.06–30.09, 120 сут. / days	1.09–20.11, 80 сут. / days	20.11–16.12, 26 сут. / days
2023	29.04–11.05, 12 сут. / days	11.05, 1 сут. / day	11.05–6.10, 148 сут. / days	23.05–7.10, 137 сут. / days	7.10–13.11, 37 сут. / days	13.11–1.12, 18 сут. / days
2024	28.04–17.05, 19 сут. / days	17.05, 1 сут. / day	17.05–7.10, 143 сут. / days	30.05–7.10, 130 сут. / days	8.10–н/д / no data	н/д no data

Весенний подледный прогрев и подледное конвективное перемешивание начались в 2023 г. в середине марта, в 2024 г. – с первых чисел марта, что могло быть связано с более теплыми погодными условиями и солнечной погодой. В предыдущие годы подледное нагревание и конвективное перемешивание также начинались в период с конца февраля до второй декады марта [Bogdanov et al., 2019]. В 2023 г. в связи с тем, что в середине марта температура по всему водному столбу была очень низкой (среднее значение 0,3 °C), конвективное перемешивание достигло дна довольно быстро, за 10 суток, к 24 марта, и затем водный столб нагревался в полностью перемешанном состоянии еще более месяца – до 27–28 апреля. Весной 2024 г. также происходило довольно быстрое заглубление нижней границы конвективного слоя (на 0,5–0,9 м в дневные часы), что соизмеримо со скоростями, наблюдаемыми в предыдущие годы в период конвекции в Петрозаводской губе Онежского озера [Bogdanov et al., 2019], а также в других глубоких водоемах [Kirillin et al., 2012].

К концу ледостава температура конвективного слоя повысилась вследствие радиационного нагревания до 1,7 °C весной 2023 г. и до 1,0 °C весной 2024 г. Весенняя подледная конвекция в 2023 г. продолжалась 46 суток, в 2024 г. – около 60 суток, в предыдущие годы измерений на автономной станции этот период длился 1,0–1,5 месяца.

Радиационное нагревание покрытых льдом водоемов играет важнейшую роль в термическом режиме озер в конце периода ледостава [Kirillin et al., 2012]. Весеннее подледное перемешивание регулирует ранневесеннее развитие фитопланктона, так как восходящие конвективные токи доставляют питательные вещества в фотическую зону и удерживают в ее пределах неспособные к самостоятельному передвижению виды фитопланктона [Пальшин и др., 2019], а нисходящие токи могут переносить клетки водорослей за пределы фотической зоны, что сдерживает их развитие [Калинина и др., 2024].

После освобождения ото льда весной 2023 и 2024 гг., так же как в 2021 и 2022 гг., водная толща Петрозаводской губы находилась в перемешанном состоянии в течение 2–3 недель под действием ветра и радиационно-генерированной конвекции. Такой тип конвекции наблюдается в покрытых льдом озерах [Kirillin et al., 2012], а также в озерах в условиях открытой воды при повышении температуры воды в диапазоне от 0 до 3,98 °C (температура максимальной плотности пресной воды). Наиболее

длительный период весеннего перемешивания (60 сут.) наблюдался весной 2020 г., когда лед разрушился 22 марта, а стратификация установилась лишь 23 мая.

Прохождение термобара в 2023 (11 мая) и в 2024 (17 мая) годах произошло раньше среднемноголетних сроков (конец мая), как и в предыдущие годы измерений на автономной станции (табл. 3). Можно заключить, что в последние годы на фоне потепления регионального климата характерно более раннее прохождение термобара по акватории губы по сравнению со среднемноголетними сроками.

После прохождения термобара весной 2023 и 2024 гг. на фоне теплой маловетреной погоды в течение одного дня произошло формирование стратификации, как и весной 2021 г. [Здоровеннова и др., 2023]. Весной 2016, 2020 и 2022 гг. [Здоровеннова и др., 2023] на фоне ветреной и прохладной погоды водная толща губы оставалась в перемешанном состоянии при температуре 4–6 °C еще 7–17 суток.

Таким образом, период весеннего перемешивания в условиях открытой воды (от взлома льда до установления стратификации) продолжался в 2023 и 2024 гг. две и три недели соответственно, что близко к значениям предыдущих лет наблюдений на станции – 2–4 недели в 2016, 2021 и 2022 г. Аномально продолжительным был этот период весной 2020 г. (более двух месяцев), когда стратификация установилась лишь 23 мая.

В период весеннего перемешивания в условиях открытой воды происходят важные процессы, оказывающие влияние на функционирование озерной экосистемы: аэрация водной толщи, перенос питательных веществ в фотическую зону из придонного слоя, что способствует ранневесеннему развитию фитопланктона. Оценка изменений продолжительности этого периода под влиянием изменений регионального климата является важной задачей.

Продолжительность стратификации в 2023 (148 сут.) и 2024 (143 сут.) годах была заметно больше, чем в предыдущие годы измерений (96–106 сут., см. табл. 3), главным образом за счет аномально теплых погодных условий сентября.

На этапе летней стратификации 2023 и 2024 гг. разница температуры по водному столбу периодически увеличивалась до 10–14 °C, как и в предыдущие годы измерений на автономной станции (рис. 2). Однако в периоды похолоданий, которые были обусловлены прохождением циклонов, стратификация заметно ослабевала и разница температур верхнего и придонного слоев уменьшалась

до 0,5–1,0 °С, прежде всего за счет резкого понижения температуры верхнего слоя воды. Интересно, что во второй половине июля – сентябре периодически наблюдались резкие повышения температуры придонного слоя и возврат к предыдущим значениям через несколько дней. Наиболее часто это происходило летом 2020, 2023 и 2024 гг. (рис. 2, а, г, д). Предположительно, такой характер изменения температуры был обусловлен опусканием

воды из прогретого верхнего слоя в нижележащие слои при конвергенции течений.

Летом 2024 г. температура придонного слоя превышала 15 °С с 29 июля по 1 августа, 3–11, 14–16, 22–23 августа, 10–11, 15–19 и 23–25 сентября 2024 г. Температура в этом слое превышала 10 °С практически непрерывно с 23 июля по 23 августа и со 2 по 29 сентября 2024 г., то есть более 53 суток. С чем была связана эта ситуация, пока установить не удалось.

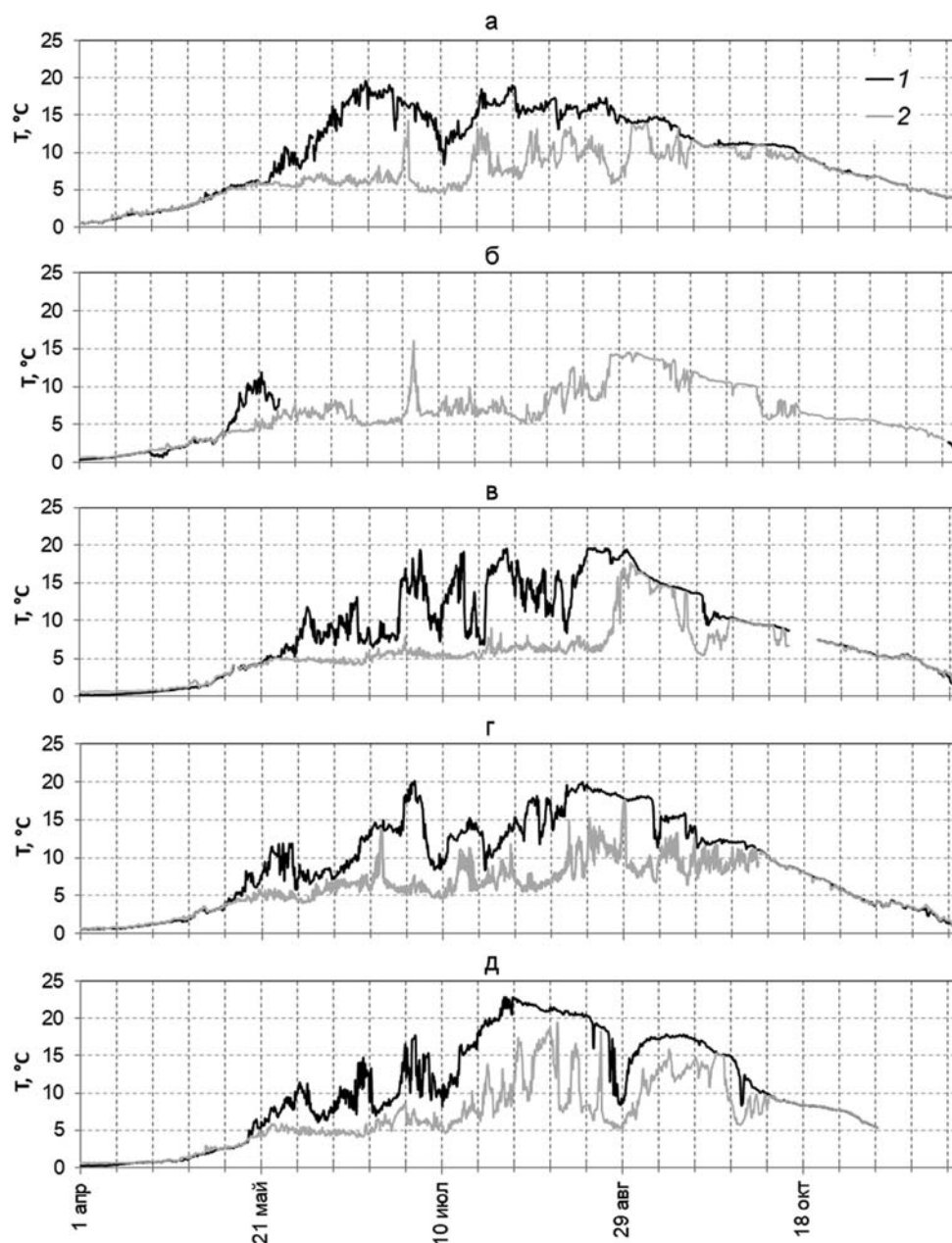


Рис. 2. Температура воды верхнего (1) и придонного (2) слоев Петрозаводской губы Онежского озера в период с 1 апреля по 30 ноября в 2020 (а), 2021 (б), 2022 (в), 2023 (г), 2024 (д) гг.

Fig. 2. Water temperature of the upper (1) and bottom (2) layers of Petrozavodsk Bay of Lake Onego from April 1 to November 30 in 2020 (а), 2021 (б), 2022 (в), 2023 (г), 2024 (д)

Возможная причина – особенности водообмена с открытой частью Онежского озера. Периодические эпизоды кратковременного повышения температуры воды придонного слоя отмечались и в предыдущие годы измерений на автономной станции. Например, в период с 30 июня по 3 июля 2021 г. происходило повышение температуры придонного слоя от 5,5 до 16 °С, затем к 5 июля температура понизилась до 6,24 °С. Прохладным летом 2020 г. такие эпизоды повторялись довольно часто, а в жаркие летние месяцы 2021 и 2022 гг. наблюдались заметно реже. Возможно, такой характер изменения температуры воды в придонном слое мог быть связан с опусканием теплой воды из поверхностного слоя вследствие конвергенции течений. Но летом 2024 г. периоды повышения температуры придонного слоя были заметно более длительными, чем в предыдущие годы. Столь нетипично частые повышения температуры придонного слоя воды могут оказывать влияние на условия обитания бентосного сообщества Петрозаводской губы.

Период уменьшения теплосодержания столба воды (этап осеннего охлаждения) на акватории Петрозаводской губы продолжается с середины июля до конца августа. Разрушение сезонного термоклина и полное перемешивание водной толщи озера происходит в разные годы в период с последних чисел августа до начала октября (табл. 3). Период осенней гомотермии до перехода температуры воды через 4 °С в сторону понижения продолжается в разные годы 37–87 сут. (см. табл. 3). На этом этапе водная толща полностью перемешана под совместным действием поверхностного охлаждения и ветрового воздействия. На этапе охлаждения водной толщи в диапазоне температур ниже 4 °С (предледоставный период) перемешивание происходит только в результате ветрового воздействия.

Период «биологического» лета в 2023 и 2024 гг. продолжался 137 и 130 сут. соответственно. В 2020 и 2021 гг. этот период длился 142 сут. и лишь 120 сут. в 2022 г., что связано с холодными температурными условиями мая и сентября в этот год. Переход температуры поверхностного слоя воды через 10 °С в сторону повышения наблюдался в годы измерений с 17 мая по 1 июня, в сторону понижения – с конца сентября до второй декады октября. Точно определить продолжительность этого периода для лета 2021 г. не представляется возможным, так как датчик, располагавшийся в верхнем слое озера, не работал и измерения проводились только на придонном датчике. Но если ориентироваться

на температуру воздуха и показания придонного датчика температуры, то температура верхнего слоя озера могла превышать 10 °С в период с начала июня до начала октября, то есть более 120 суток.

Увеличение продолжительности периода с температурой воды выше 10 °С на фоне потепления регионального климата установлено для ряда озер Карелии [Ефремова и др., 2016]. По измерениям на автономной станции пока нельзя утверждать о явных тенденциях изменчивости продолжительности этого периода, можно говорить лишь о том, что она существенно меняется в разные годы. Стоит отметить, что важную роль в продолжительности биологического лета играют температурные условия не только летних месяцев, но также весенних и осенних.

Заключение

В 2023 и 2024 гг. даты начала и продолжительность этапов годового термического цикла на акватории Петрозаводской губы Онежского озера заметно отличались как от многолетних значений этих показателей, так и от их значений в предыдущие годы измерений на автономной станции, что было связано с изменениями погодных условий. В зимние сезоны 2022/23 и 2023/24 гг. начало ледостава происходило в более ранние сроки относительно многолетних, окончание ледостава – также в более ранние сроки, продолжительность ледостава превышала среднемноголетнюю в зимний сезон 2023/24 гг. с более холодными погодными условиями. Сравнение пяти последовательных зимних сезонов измерений на автономной станции показало, что на фоне контрастных погодных условий осени, зимы и весны продолжительность предледоставного периода (15–83 сут.), даты установления льда (1 декабря – 31 января) и освобождения ото льда (22 марта – 3 мая) изменялись в широких пределах. Выявлена несколько бóльшая изменчивость дат начала ледостава (2 месяца) по сравнению с датами взлома льда (1,5 месяца). Продолжительность ледостава (51–153 сут.) изменялась от 1,5 до 5 месяцев.

Продолжительность периодов весеннего перемешивания в 2023 и 2024 гг. (12 и 19 сут.) была меньше, чем в предыдущие годы (22–60 сут.), а продолжительность стратификации (148 и 143 сут.) – на месяц больше, чем в другие годы (96–106 сут.).

Длительные периоды нетипично высокой температуры воды придонного слоя Петрозаводской губы летом 2024 г. (более 1,5 мес.)

могут оказывать негативное влияние на условия обитания бентосного сообщества Петрозаводской губы.

Столь выраженная изменчивость ледовой фенологии и термического режима залива крупного озера на фоне изменений регионального климата очевидно влияет на функционирование его экосистемы, что требует продолжения измерений в Петрозаводской губе и организации мониторинговых измерений в других заливах Онежского озера, в первую очередь в Кондопожской губе, испытывающей значительное антропогенное воздействие.

Литература

- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. М.: Росгидромет, 2023. 104 с.
- 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., Кравченко Т. Г., Здорovenнов Р. Э., Здорovenнова Г. Э., Богданов С. Р., Смирнов С. И. Влияние изменений климата на термический и ледовый режим озер Карелии по данным многолетних наблюдений (1950–2021 гг.) // Лимнология в России: Тез. докл. Всерос. науч. конф. (Санкт-Петербург, 12–14 февраля 2024 г.). СПб.: РАН, 2024. С. 160–161. doi: 10.12731/978-5-907645-54-7
- Здорovenнова Г. Э., Здорovenнов Р. Э., Пальшин Н. И., Ефремова Т. В. Сезонная и межгодовая изменчивость температуры воды в Петрозаводской губе Онежского озера по круглогодичным измерениям на автономной станции // Известия РГО. 2023. Т. 155, № 3-4. С. 47–61. doi: 10.31857/S0869607123030126
- Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Назарова Л. Е., Баклагин В. Н., Павлейчик В. М., Падалко Ю. А. Реакция экосистемы Онежского озера в весенне-летний период на аномально высокую температуру воздуха зимы 2019–2020 годов // Известия РАН. Сер. геогр. 2021. Т. 85, № 6. С. 888–899. doi: 10.31857/S2587556621060078
- Калинкина Н. М., Смирнова В. С., Сластина Ю. Л., Здорovenнов Р. Э., Здорovenнова Г. Э., Зобков М. Б., Теканова Е. В., Назарова Л. Е. Развитие зимнего фитопланктона Онежского озера в зависимости от физико-химических условий среды // Известия РГО. 2024. Т. 156, № 4. С. 358–374. doi: 10.31857/S0869607124040084
- 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.
- Назарова Л. Е. Современные характеристики температурного режима территории Карелии // II Лаверовские чтения. Арктика: актуальные проблемы и вызовы: Сб. науч. мат-лов Всерос. конф. с междунар. участием. Архангельск, 2023. С. 73–75.
- Пальшин Н. И., Здорovenнова Г. Э., Здорovenнов Р. Э., Ефремова Т. В., Гавриленко Г. Г., Терзhevik А. Ю. Влияние весенней подледной освещенности и конвективного перемешивания на распределение хлорофилла «а» в малом мезотрофном озере // Водные ресурсы. 2019. Т. 46, № 3. С. 259–269. doi: 10.31857/S0321-0596463259-269
- Расписание погоды. Rp5.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://rp5.ru/> (дата обращения: 15.02.2025).
- Bogdanov S., Zdorovennova G., Volkov S., Zdorovennov R., Palshin N., Efremova T., Terzhevik A., Bouffard D. Structure and dynamics of convective mixing in Lake Onego under ice-covered conditions // Inland Waters. 2019. Vol. 9(2). P. 177–192. doi: 10.1080/20442041.2018.1551655
- 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(2). P. 130–141. doi: 10.1080/20442041.2018.1533355
- Gudasz C., Bastviken D., Steger K., Premke K., Sobek S., Tranvik L. J. Temperature-controlled organic carbon mineralization in lake sediments // Nature. 2010. Vol. 466(7305). P. 478–481. doi: 10.1038/nature09186
- Hampton S. E., Galloway A. W. E., Powers S. M. et al. Ecology under lake ice // Ecol. Lett. 2017. Vol. 20. P. 98–111. doi: 10.1111/ele.12699
- Hampton S. E., Powers S. M., Dugan H. A., Knoll L. B., McMeans B. C., Meyer M. F., O'Reilly C. M., Ozersky T., Sharma S., Barrett D. C., Chandra S., Jansen J., McClure R. P., Rautio M., Weyhenmeyer G. A., Yang X. Environmental and societal consequences of winter ice loss from lakes // Sciences. 2024. Vol. 386. Art. 6718. doi: 10.1126/science.adl321
- IPCC. Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Электронный ресурс]. Cambridge University Press, 2021. URL: <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781009157896/type/book> (дата обращения: 26.02.2025).
- Jansen J., MacIntyre S., Barrett D.C., Chin Y.-P., Cortés A., Forrest A. L., Hrycik A. R., Martin R., McMeans B. C., Rautio M., Schwefel R. Winter limnology: How do hydrodynamics and biogeochemistry shape ecosystems under ice? // J. Geophys. Res. Biogeosci. 2021. Vol. 126. e2020JG006237. doi: 10.1029/2020JG006237
- Kirillin G., Bernhardt J., Engelhardt C., Leppäranta M., Terzhevik A., Efremova T., Palshin N., Zdorovennova G., Zdorovennov R., Golosov S., Granin N., Shershtyankin P. Physics of seasonally ice-covered lakes: a review // Aquat. Sci. 2012. Vol. 74(4). P. 659–682. doi: 10.1007/s00027-012-0279-y
- Naderian D., Noori R., Bateni S. M., Jun C., Kim D., Shahmohammad M., Alizadeh F., Kianmehr P., Woolway R. I. Pivotal role of snow depth, local atmospheric conditions, and large-scale climate signals on ice thinning in Finnish lakes // Sci. Total Environ. 2025. Vol. 966. Art. 178715. doi: 10.1016/j.scitotenv.2025.178715
- 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(24). P. 10773–10781. doi: 10.1002/2015GL066235

Sharma S., Blagrove K., Magnuson J. J., Oreilly C., Oliver S., Batt R. D., Magee M. R., Straile D., Weyhenmeyer G., Winslow L., Woolway R. I. Widespread loss of lake ice around the Northern Hemisphere in a warming world // *Nat. Clim. Change*. 2019. Vol. 9(3). P. 227–231. doi: 10.1038/s41558-018-0393-5

Thackeray S. J., Jones I. D., Maberly S. C. Long-term change in the phenology of spring phytoplankton: Species-specific responses to nutrient enrichment and climatic change. // *J. Ecol.* 2008. Vol. 96(3). P. 523–535. doi: 10.1111/j.1365-2745.2008.01355.x

Weyhenmeyer G. A., Obertegger U., Rudebeck H., Jakobsson E., Jansen J., Zdrovennova G., Bansal Sh., Block B. D., Carey C. C., Doubek J. P., Dugan H., Erina O., Fedorova I., Fischer Ja. M., Grinberga L., Grossart H. P., Kangur K., Knoll L. B., Laas A., Lepori F., Meier Ja., Palshin N., Peterzell M., Pulkkanen M., Rusak Ja. A., Sharma S., Wain D., Zdrovennov R. Towards critical white ice conditions in lakes under global warming // *Nat. Commun.* 2022. Vol. 13. Art. 4974. doi: 10.1038/s41467-022-32633-1

Winder M., Schindler D. E. Climate effects on the phenology of lake processes // *Glob. Change Biol.* 2004. Vol. 10(11). P. 1844–1856.

Woolway R. I., Merchant C. J. Worldwide alteration of lake mixing regimes in response to climate change // *Nat. Geosci.* 2019. Vol. 12(4). P. 271–276. doi: 10.1038/s41561-019-0322-x

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. P. 388–403. doi: 10.1038/s43017-020-0067-5

Zhou S., Long H., Chen W., Qiu C., Zhang C., Xing H., Zhang J., Cheng L., Zhao C., Cheng J., Ciais P. Temperature seasonality regulates organic carbon burial in lake // *Nat. Commun.* 2025. Vol. 16. Art. 1049. doi: 10.1038/s41467-025-56399-4

References

Bogdanov S., Zdrovennova G., Volkov S., Zdrovennov R., Palshin N., Efremova T., Terzhevik A., Bouffard D. Structure and dynamics of convective mixing in Lake Onego under ice-covered conditions. *Inland Waters*. 2019;9(2):177–192. doi: 10.1080/20442041.2018.1551655

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

Efremova T. V., Pal'shin N. I., Kravchenkova T. G., Zdrovennov R. E., Zdrovennova G. E., Bogdanov S. R., Smirnov S. I. The impact of climate change on the thermal and ice regime of lakes in Karelia based on long-term observations (1950–2021). *Limnologiya v Rossii: Tez. dokl. Vseros. nauch. konf. (Sankt-Peterburg, 12–14 fevralya 2024 g.) = Limnology in Russia: Proceed. of the All-Russian scientific conf. (St. Petersburg, Feb. 12–14, 2024)*. St. Petersburg; 2024. P. 160–161. (In Russ.). doi: 10.12731/978-5-907645-54-7

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;9(2):130–141. doi: 10.1080/20442041.2018.1533355

Gudas C., Bastviken D., Steger K., Premke K., Sobek S., Tranvik L. J. Temperature-controlled organic carbon mineralization in lake sediments. *Nature*. 2010; 466(7305):478–481. doi: 10.1038/nature09186

Hampton S. E., Galloway A. W. E., Powers S. M. et al. Ecology under lake ice. *Ecol. Lett.* 2017;20:98–111. doi: 10.1111/ele.12699

Hampton S. E., Powers S. M., Dugan H. A., Knoll L. B., McMeans B. C., Meyer M. F., O'Reilly C. M., Ozersky T., Sharma S., Barrett D. C., Chandra S., Jansen J., McClure R. P., Rautio M., Weyhenmeyer G. A., Yang X. Environmental and societal consequences of winter ice loss from lakes. *Sciences*. 2024;386:6718. doi: 10.1126/science.adl321

IPCC. Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press; 2021. URL: <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781009157896/type/book> (accessed: 26.02.2025).

Jansen J., MacIntyre S., Barrett D. C., Chin Y.-P., Cortés A., Forrest A. L., Hryciuk A. R., Martin R., McMeans B. C., Rautio M., Schwefel R. Winter limnology: How do hydrodynamics and biogeochemistry shape ecosystems under ice? *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2021;126:e2020JG006237. doi: 10.1029/2020JG006237

Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Efremova T. V., Pal'shin N. I., Nazarova L. E., Baklagin V. N., Pavleichik V. M., Padalko Yu. A. Response of the Lake Onego ecosystem in the spring–summer period to anomaly high air temperature in winter 2019/2020. *Izvestiya RAN. Ser. geogr. = Izvestiya RAN. Geographical Series*. 2021;85(6):888–899. (In Russ.). doi: 10.31857/S2587556621060078

Kalinkina N. M., Smirnova V. S., Slastina Yu. L., Zdrovennov R. E., Zdrovennova G. E., Zobkov M. B., Tekanova E. V., Nazarova L. E. Development of winter phytoplankton of Lake Onego in connection with physical and chemical conditions of the environment. *Izvestiya RGO = Proceedings of the RGS*. 2024;156(4): 358–374. (In Russ.). doi: 10.31857/S0869607124040084

Kirillin G., Bernhardt J., Engelhardt C., Leppäranta M., Terzhevik A., Efremova T., Palshin N., Zdrovennova G., Zdrovennov R., Golosov S., Granin N., Sherstyankin P. Physics of seasonally ice-covered lakes: a review. *Aquat. Sci.* 2012;74(4):659–682. doi: 10.1007/s00027-012-0279-y

Naderian D., Noori R., Bateni S. M., Jun C., Kim D., Shahmohammad M., Alizadeh F., Kianmehr P., Woolway R. I. Pivotal role of snow depth, local atmospheric conditions, and large-scale climate signals on ice thinning in Finnish lakes. *Sci. Total Environ.* 2025;966:178715. doi: 10.1016/j.scitotenv.2025.178715

Nazarova L. E. Current characteristics of the temperature regime on the territory of Karelia. *Il Laverovskie chteniya. Arktika: aktual'nye problemy i vyzovy: Sb. nauch. mat-lov Vseros. konf. s mezhdunar. uchastiem = Il Laverov readings. The Arctic: current problems*

and challenges: *Proceed. of the All-Russian conf. with int. part.* Arkhangel'sk; 2023. P. 73–75. (In Russ.)

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

Palshin N. I., Zdorovenнова G. E., Zdorovennov R. E., Efremova T. V., Gavrilenko G. G., Terzhhevik A. Y. Effect of under-ice light intensity and convective mixing on chlorophyll a distribution in a small mesotrophic lake. *Water Resources.* 2019;46(3):384–394. doi: 10.1134/S0097807819030175

Report on climate features in the Russian Federation for 2022. Moscow: Roshydromet; 2023. 104 p. (In Russ.)

Sharma S., Blagrove K., Magnuson J. J., Oreilly C., Oliver S., Batt R. D., Magee M. R., Straile D., Weyhenmeyer G., Winslow L., Woolway R. I. Widespread loss of lake ice around the Northern Hemisphere in a warming world. *Nat. Clim. Change.* 2019;9(3):227–231. doi: 10.1038/s41558-018-0393-5

Thackeray S. J., Jones I. D., Maberly S. C. Long-term change in the phenology of spring phytoplankton: Species-specific responses to nutrient enrichment and climatic change. *J. Ecol.* 2008;96(3):523–535. doi: 10.1111/j.1365-2745.2008.01355.x

Filatov N. N. (ed.). The largest lakes-reservoirs of the North-West of the European territory of Russia: the current state and changes in ecosystems under climatic and anthropogenic impact. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. 375 p. (In Russ.)

Weather schedule. Rp5.ru. URL: <https://rp5.ru/> (accessed: 15.02.2025).

Weyhenmeyer G. A., Obertegger U., Rudebeck H., Jakobsson E., Jansen J., Zdorovenнова G., Bansal Sh., Block B. D., Carey C. C., Doubek J. P., Dugan H., Eri-na O., Fedorova I., Fischer Ja. M., Grinberga L., Gros-sart H. P., Kangur K., Knoll L. B., Laas A., Lepori F., Meier Ja., Palshin N., Peternell M., Pulkkanen M., Rusak Ja. A., Sharma S., Wain D., Zdorovennov R. Towards critical white ice conditions in lakes under global warming. *Nat. Commun.* 2022;13:4974. doi: 10.1038/s41467-022-32633-1

Winder M., Schindler D. E. Climate effects on the phenology of lake processes. *Glob. Change Biol.* 2004;10(11):1844–1856.

Woolway R. I., Merchant C. J. Worldwide alteration of lake mixing regimes in response to climate change. *Nat. Geosci.* 2019;12(4):271–276. doi: 10.1038/s41561-019-0322-x

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;1:388–403. doi: 10.1038/s43017-020-0067-5

Zdorovenнова G. E., Zdorovennov R. E., Pal'shin N. I., Efremova T. V. Seasonal and inter-annual variability of water temperature in Petrozavodsk Bay of Lake Onega. *Izvestiya RGO = Proceedings of the RGS.* 2023;155(3-4):47–61. (In Russ.). doi: 10.31857/S0869607123030126

Zhou S., Long H., Chen W., Qiu C., Zhang C., Xing H., Zhang J., Cheng L., Zhao C., Cheng J., Ciais P. Temperature seasonality regulates organic carbon burial in lake. *Nat. Commun.* 2025;16:1049. doi: 10.1038/s41467-025-56399-4

Поступила в редакцию / received: 28.05.2025; принята к публикации / accepted: 11.07.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Здорovenнова Галина Эдуардовна

канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник,
руководитель лаборатории гидрофизики

e-mail: zdorovennova@gmail.com

Здорovenнов Роман Эдуардович

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: romga74@gmail.com

Новикова Юлия Сергеевна

аспирант, младший научный сотрудник

e-mail: novyuliana@gmail.com

Ефремова Татьяна Владимировна

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

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

CONTRIBUTORS:

Zdorovennova, Galina

Cand. Sci. (Geog.), Leading Researcher,
Head of Hydrophysics Laboratory

Zdorovennov, Roman

Cand. Sci. (Geog.), Senior Researcher

Novikova, Iuliia

Doctoral Student, Junior Researcher

Efremova, Tatiana

Cand. Sci. (Geog.), Senior Researcher