

## ЛЕДОВАЯ ФЕНОЛОГИЯ РАЗНОТИПНЫХ ОЗЁР КАРЕЛИИ ПО ДАННЫМ МНОГОЛЕТНИХ НАБЛЮДЕНИЙ (1950–2021)

© 2026 г. Т. В. Ефремова<sup>1</sup>, Б. З. Белашев<sup>2</sup>, Н. И. Пальшин<sup>1</sup>, Г. Э. Здравеннова<sup>1,\*</sup>,  
С. Р. Богданов<sup>1</sup>, Р. Э. Здравеннов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия

<sup>2</sup>Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия

\*e-mail: zdorovennova@gmail.com

Поступила в редакцию 30.06.2025 г.

После доработки 24.09.2025 г.

Принята к публикации 29.12.2025 г.

Проведён анализ временных рядов сезонных, среднегодовых данных о температуре воздуха и ледовой фенологии девяти озёр Карелии с целью выявления статистически значимых трендов и сдвигов климатических режимов за период 1950–2021 гг. Анализ данных наблюдений за температурой приземного воздуха на 8 метеорологических станциях свидетельствует о сохраняющемся устойчивом потеплении регионального климата Карелии во все сезоны года, при этом более высокие темпы потепления характерны для зимы и весны. Установлен статистически значимый тренд смещения дат установления ледостава на всех озёрах на более поздние сроки со скоростью +1.3–4.1 сут/10 лет, а сроков схода льда на более ранние сроки со скоростью –1.1–2.0 сут/10 лет. Продолжительность ледостава сократилась в среднем на 15–25 суток (особенно за счёт более позднего замерзания), а для крупных озёр Онежского и Сегозера на 35–40 сут. С использованием тестового анализа режимных сдвигов обнаружены доказательства резких изменений средней зимней температуры воздуха в 1988/89 г., а также весенней температуры воздуха и очищения озёр ото льда в 1999/2000 г. Скорость сокращения продолжительности ледостава ускорилась в последние десятилетия, а большие глубокие озера наиболее чувствительны к изменению климата и более подвержены потере ледяного покрова, чем небольшие озера в том же регионе.

**Ключевые слова:** озёра, ледовая фенология, температура воздуха, тренд, смены режима, озёра Карелии

DOI: 10.7868/S2412376526010087

### ВВЕДЕНИЕ

Одна из актуальных задач современной лимнологии — выявление закономерностей реакции водоёмов на глобальные и региональные изменения климата, оказывающих в последние десятилетия значительное влияние на ледовый и термический режимы бореальных озёр. Глобальное потепление климата происходит в первую очередь за счёт повышения температуры воздуха, причём каждое последующее десятилетие с 80-х гг. двадцатого века характеризуется более высокими температурами по сравнению с предыдущим десятилетием (Третий доклад..., 2022).

Озёрный лёд — чувствительный индикатор климата, и накопленные данные ледовой фенологии большого количества озёр в Северном полушарии свидетельствуют о том, что сроки замерзания озёр сместились к более поздним датам, а сроки разрушения льда — к более ранним датам, и, следовательно, к меньшей продолжительности ледостава (Benson et al., 2012; Magnuson et al., 2000; Sharma et al., 2021; Basu et al., 2024). В динамике ледового режима с каждым десятилетием происходят более быстрые изменения (Sharma et al., 2019; Basu et al., 2024), что придаёт ещё большую актуальность этой области исследований. Кроме того, в результате потепления климата увеличива-

ется как доля озёр, которые не замерзают полностью в течение зимнего сезона, так и частота лет без ледостава на отдельных озёрах (Sharma et al., 2019; Filazzola et al., 2020).

В последние десятилетия особенно быстрое сокращение ледяного покрова наблюдается в крупных глубоководных озёрах (Sharma et al., 2021). Большим глубоким озёрам требуется больше времени для охлаждения осенью и, соответственно, бóльшая сумма зимних отрицательных температур для образования ледостава (Kirillin et al., 2012; Leppäranta, 2015). В аномально мягкую зиму 2019/20 г. впервые за всё время инструментальных наблюдений не замёрзло второе по величине озеро Европы — Онежское, льдом покрылись только северные заливы (Калинкина и др., 2021). Для озёр с ежегодно наблюдающимся ледоставом отсутствие льда можно считать экстремальным событием (Benson et al., 2012; Filazzola et al., 2020).

В последние годы использование данных спутниковых наблюдений и методов дистанционного зондирования значительно расширило возможности получения информации о ледовой фенологии, тем не менее натурные данные долгосрочных временных рядов помогают оценить изменения ледовых событий за более длительные периоды и необходимы для проверки и калибровки новых методов измерений.

В средних и небольших бореальных озёрах Карелии обычно образуется стабильный ледяной покров в течение 5–6 месяцев в году. Анализ временных рядов ледовых событий восьми разнотипных озёр Карелии за период 1950–2009 гг. показал, что значимые тренды уменьшения продолжительности ледостава отмечались только в крупных глубоководных озёрах Онежское и Сегозеро (Efremova et al., 2013). В данной работе мы рассматриваем расширенные и дополненные данные по ледовой фенологии этих озёр по 2021 г. включительно.

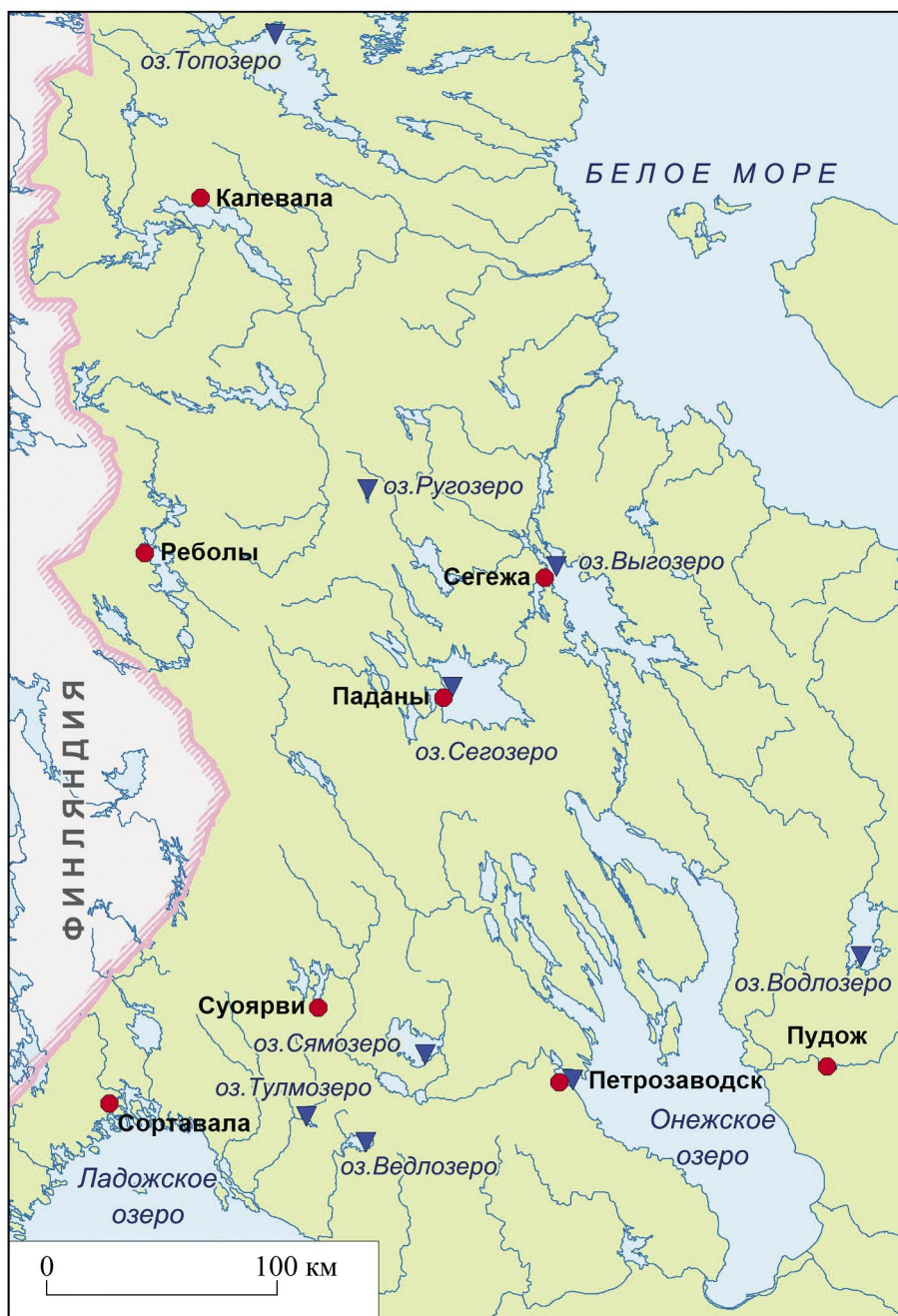
Для оценки трендов временных рядов, как правило, используются стандартные методы линейного регрессионного анализа. Несмотря на то что линейные тренды, безусловно, отражают направление и скорость происходящих процессов, их использование предполагает, что озёра подвергаются медленным и монотонным изменениям во времени. В действительности, во временных рядах могут наблюдаться нелинейные ступенчатые изменения, которые делят

временной ряд на отрезки с различными статистическими свойствами, называемыми сменами режимов (Rodionov, 2004). Смена режима характеризуется резким переходом из одного квазистационарного климатического состояния в другое. Авторы большого количества работ отмечают резкое широкомасштабное потепление климата в умеренных и высоких широтах Евразии в конце 1980-х гг. (Rodionov, Overland, 2005; North et al., 2013; Reid et al., 2016; Jaagus et al., 2017). Основной гипотезой воздействия на каскад резких изменений в окружающей среде, который произошёл в это время, выдвигается сдвиг температуры воздуха, вызванный изменениями в крупномасштабной атмосферной циркуляции.

Цель работы — анализ изменений, т.е. трендов и сдвига режима в долгосрочных временных рядах ледовой фенологии в разнотипных озёрах Карелии за период 1950–2021 гг.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Характеристика ледовой фенологии 9 разнотипных озёр Карелии (рис. 1) основана на статистической обработке и анализе данных многолетних наблюдений гидрологических постов Карельского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (далее — ЦГМС) за 1950–2021 гг. (даты замерзания и очищения озёр ото льда). За начало ледостава на гидрологических постах принимается дата образования устойчивого неподвижного ледяного покрова (продолжительностью не менее 20 сут) в поле зрения наблюдательного пункта. За дату очищения ото льда принимается первый день, начиная с которого ледовые явления в данном сезоне более не наблюдались. Материалы наблюдений за период с 1950 по 1989 г. получены из гидрологических ежегодников (Ежегодники..., 1950–1989), данные за 1990–2009 гг. приобретены в Карельском ЦГМС, данные за 2010–2021 гг. получены на веб-сервисе “Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов” (АИС ГМВО), находящемся в открытом доступе (Автоматизированная..., 2025). Отмечено, что пост наблюдений в Онежском озере находится в Петрозаводской губе, термические и ледовые условия которой отличаются от открытой части озера, но в целом отражают основные тенденции изменений в озере. Материалы наблюдений, представленные в (Efremova et al., 2013), дополнены данными по 2021 г. и в анализ включены наблюдения, полученные на озере Ведлозеро за аналогичный период.



**Рис. 1.** Карта расположения исследуемых озёр. Синие треугольники — гидрологические посты, красные кружки — метеостанции

**Fig. 1.** Map of the location of the lakes under study. Blue triangles are hydrological posts, red circles are weather stations

Исследуемые озёра расположены в северной, центральной и южной Карелии (Справочник..., 2013) от 61° до 66° с.ш. и от 31° до 37° в.д. (см. рис. 1). Озёра разнообразны по своим морфометрическим характеристикам (табл. 1). В выборку входят второе по величине озеро Европы Онежское, большие по площади озёра > 800 км<sup>2</sup> (Сегозеро, Топозеро, Выгозеро), средние озёра

60–320 км<sup>2</sup> (Сямозеро, Водлозеро, Ведлозеро) и малые озёра < 15 км<sup>2</sup> (Ругозеро, Тулмозеро).

Для оценки связи ледовой фенологии с метеорологическими данными для каждого озера подбиралась ближайшая репрезентативная метеостанция (далее — МС): оз. Топозеро — МС Калевала, оз. Ругозеро — МС Реболы, оз. Выгозеро —

**Таблица 1.** Географические характеристики исследуемых озёр**Table 1.** Geographic characteristics of the studied lakes

Название	Широта, ° с.ш.	Долгота, ° в.д.	Площадь, км <sup>2</sup>	Средняя глубина, м	Максим. глубина, м	Объём, км <sup>3</sup>
Топозеро	65.8	31.8	986	16	56	15.6
Ругозеро	64.1	32.8	10.7	2.5	8	0.026
Выгозеро	63.4	35.3	1140	6.2	25	6.46
Сегозеро	63.3	33.4	815	29	103	23.4
Водлозеро	62.3	36.9	322	2.8	16.3	0.906
Сямозеро	61.9	33.3	266	6.7	24.5	1.79
Онежское	61.8	34.8	9777	26.8	119	262
Ведлозеро	61.5	32.7	58	7.0	14.8	0.407
Тулмозеро	61.4	32.2	14.5	5	24	0.072

МС Сегежа, оз. Сегозеро — МС Паданы, оз. Водлозеро — МС Пудож, оз. Сямозеро, МС Суоярви, оз. Ведлозеро, оз. Тулмозеро — МС Сортавала, оз. Онежское — МС Петрозаводск. В анализе использовались среднемесячные данные (МС Сегежа, Паданы, Пудож, Суоярви) и среднесуточные данные (МС Калевала, Реболы, Петрозаводск, Сортавала) стандартных наблюдений приземной температуры воздуха за период 1950–2021 гг., полученные на сайте Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД), находящихся в открытом доступе (Всероссийский..., 2025).

Климатические изменения в регионе определяются как глобальными процессами в атмосфере, так и местными физико-географическими условиями; в первую очередь для территории Карелии это связано с влиянием Белого моря и крупнейших в Европе Ладожского и Онежского озёр, водные массы которых в зависимости от сезона могут оказывать тепляющее или охлаждающее влияние.

Для выявления долгосрочных изменений регионального климата рассчитывались средние температуры воздуха за год и за зимний (декабрь–март) и весенний (апрель–май) сезоны для всех метеостанций. Для характеристики “мягкости” зимы в зимний сезон по данным двух северных (МС Калевала и Реболы) и двух южных

(МС Петрозаводск и Сортавала) метеостанций определялось количество дней с оттепелю (средняя суточная температура воздуха выше 0 °С), а для характеристики “суровости” зимы также были рассчитаны накопленные суммы градусо-дней отрицательных среднесуточных температур для зимнего периода каждого года и определено количество дней со средней суточной температурой воздуха ниже –10 и ниже –20 °С.

При обработке натуральных данных временных рядов для анализа трендов применялся метод линейной регрессии. Уровень статистической значимости трендов оценивали на основе *t*-статистики Стьюдента. Для оценки статистической значимости трендов использовался 5%-ный уровень ( $p < 0.05$ ).

Линейный регрессионный анализ не учитывает внутреннюю изменчивость временного ряда, а во временном ряду могут наблюдаться резкие изменения или смены режимов (regime shift). Методы обнаружения смены режима весьма многочисленны (Liu et al., 2016), в работе использован метод обнаружения сдвигов в среднем (Rodionov, 2004; Rodionov, Overland, 2005), который может автоматически находить несколько точек изменения режима. Сдвиг происходит, когда существует статистически значимая разница между средним значением временного ряда до и после определённой точки, рассчитанной с помощью *t*-теста Стьюдента (STARS) в зави-

симости от порогового уровня значимости ( $p$ ), длины отрезка временного ряда ( $L$ ) и весового параметра Хубера ( $h$ ). Весовой параметр Хубера определяет вес выбросов в расчёте средних значений до и после сдвига. После проведения тестовых расчётов был использован сравнительно консервативный набор входных параметров:  $p = 0.05$ ;  $L = 20$  лет,  $h = 2$ . Результат метода заключается в нахождении года, когда происходит смена режима. Временной ряд может содержать несколько статистически значимых сдвигов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

*Температура воздуха* широко признана наиболее важным климатическим фактором ледо-

вой фенологии (Palecki, Barry, 1986; Benson et al., 2012; Imrit, Sharma, 2021). Анализ рядов наблюдений приземной температуры воздуха на рассматриваемых метеостанциях показал, что за период 1950–2021 гг. отмечено повышение среднегодовой температуры воздуха со скоростью 0.28–0.34 °C/10 лет (табл. 2). Значимые тренды потепления наблюдались на всех метеостанциях во все сезоны года. Во внутригодовом ходе изменение внутри сезонных значений температуры воздуха происходило неравномерно: наибольшая скорость потепления за этот период отмечена зимой (0.41–0.54 °C/10 лет), весной скорость потепления составила 0.28–0.36 °C/10 лет, летом — 0.16–0.23 °C/10 лет, осенью — 0.21–0.27 °C/10 лет ( $p < 0.05$ ).

**Таблица 2.** Оценки линейного тренда временных рядов среднегодовой, зимней (декабрь–март), весенней (март–апрель) температуры воздуха, среднего за зимний сезон количества дней с оттепелями, накопленных сумм градусо-дней отрицательных среднесуточных температур за зиму каждого года, количества дней со средней суточной температурой воздуха ниже –10 и –20 °C за период 1950–2021 и 1976–2021 гг.

$b$  — коэффициент линейного тренда (сутки/10 лет),  $r^2$  — вклад тренда в дисперсию,  $p$  — уровень значимости

**Table 2.** Estimates of the linear trend of mean annual, winter (December–March), and spring (March–April) air temperatures, the mean number of days with thaws during the winter season, the accumulated sums of freezing degree-days during the winter of each year, the number of days with average air temperature below –10 and –20 °C for the period 1950–2021 and 1976–2021.

$b$  is the linear trend coefficient (days/10 years),  $r^2$  is the contribution of the trend to the variance,  $p$  — is the significance level

Название метеостанции	Параметры	1950–2021			1976–2021		
		$b$	$r^2$	$p$	$b$	$r^2$	$p$
Калевала	Год	+0.280	0.2076	0.0001	+0.663	0.4930	0.0000
	Зима	+0.426	0.1071	0.0053	+0.907	0.2190	0.0010
	Весна	+0.360	0.2007	0.0001	+0.490	0.1856	0.0028
	Оттепели	+1.168	0.1011	0.0065	+1.760	0.0805	0.0561
	Суммы градусо-дней	+81.61	0.1892	0.0001	+149.167	0.3377	0.00002
	Температура < –10 °C	–2.883	0.1244	0.0024	–5.578	0.2132	0.0012
	Температура < –20 °C	–1.058	0.054	0.0495	–3.177	0.1939	0.0022
Реболы	Год	+0.313	0.2795	0.0000	+0.590	0.4369	0.0000
	Зима	+0.499	0.1380	0.0014	+0.848	0.1763	0.0037
	Весна	+0.356	0.2180	0.0000	+0.416	0.1472	0.0085
	Оттепели	+1.575	0.1513	0.0008	+2.361	0.1135	0.0237
	Суммы градусо-дней	+73.69	0.1797	0.0003	+135.293	0.2782	0.0002
	Температура < –10 °C	–3.090	0.1371	0.0014	–5.047	0.1702	0.0044
	Температура < –20 °C	–0.799	0.0343	0.1192	–2.288	0.1163	0.0204

Таблица 2. Окончание

Название метеостанции	Параметры	1950–2021			1976–2021		
		<i>b</i>	$r^2$	<i>p</i>	<i>b</i>	$r^2$	<i>p</i>
Сегежа	Год	+0.289	0.2297	0.0000	+0.598	0.4375	0.0000
	Зима	+0.461	0.1305	0.0020	+0.805	0.1812	0.0032
	Весна	+0.316	0.1669	0.0004	+0.444	0.1575	0.0063
Паданы	Год	+0.317	0.2658	0.0000	+0.606	0.4131	0.0000
	Зима	+0.436	0.1161	0.0036	+0.767	0.1555	0.0067
	Весна	+0.315	0.1869	0.0001	+0.457	0.1835	0.0030
Суоярви	Год	+0.327	0.3226	0.0000	+0.591	0.4435	0.0000
	Зима	+0.513	0.1664	0.0000	+0.778	0.1806	0.0040
	Весна	+0.344	0.2257	0.0000	+0.360	0.1239	0.0177
Пудож	Год	+0.289	0.2493	0.0000	+0.585	0.4109	0.0000
	Зима	+0.409	0.0631	0.0346	+1.093	0.1861	0.0028
	Весна	+0.285	0.1478	0.0009	+0.374	0.1220	0.0173
Петрозаводск	Год	+0.308	0.2926	0.0000	+0.556	0.4154	0.0000
	Зима	+0.446	0.1214	0.0029	+0.778	0.1578	0.0063
	Весна	+0.302	0.1974	0.0001	+0.380	0.3935	0.0068
	Оттепели	+2.458	0.1832	0.0002	+3.142	0.1071	0.0017
	Суммы градусо-дней	+72.88	0.1921	0.0001	+105.745	0.2016	0.0001
	Температура < –10 °С	–2.769	0.1225	0.0026	–4.284	0.1337	0.0124
	Температура < –20 °С	–0.411	0.0123	0.3542	–1.058	0.0359	0.2071
Сортавала	Год	+0.334	0.3247	0.0000	+0.613	0.4599	0.0000
	Зима	+0.539	0.1598	0.0006	+0.939	0.2174	0.0011
	Весна	+0.327	0.2720	0.0000	+0.362	0.1772	0.0036
	Оттепели	+2.832	0.1608	0.0005	+4.874	0.1756	0.0037
	Суммы градусо-дней	+78.49	0.2047	0.00007	+125.922	0.2546	0.0003
	Температура < –10 °С	–3.378	0.1754	0.0003	–5.090	0.1836	0.0030
	Температура < –20 °С	–0.740	0.0467	0.0682	–1.634	0.1187	0.0190

Поскольку для Европейской территории России выявлен период ускоренного роста температуры приземного воздуха с 1976 г. (Второй доклад..., 2014), был выполнен анализ трендов временных рядов с этого года. Среднегодовая скорость роста температуры приземного воз-

духа за 1976–2021 гг. существенно увеличилась и равнялась 0.56–0.66 °С/10 лет. Зимой наблюдался наиболее быстрый рост температуры, в среднем 0.78–1.09 °С/10 лет, максимальный рост отмечен в декабре 0.99–1.36 °С/10 лет ( $p < 0.05$ ).

Быстрый рост температуры в периоды, предшествующие установлению ледостава, замедляет накопление суммы отрицательных температур воздуха, необходимой для выхолаживания водоёма и его замерзания. В зимний период увеличилось количество дней с оттепелями в среднем за период 1976–2021 гг. в северной и центральной Карелии на 2 суток в 10 лет, а в южной Карелии — на 3–4 сут. Количество морозных дней с температурами ниже  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , наоборот, уменьшалось со скоростью 4–5 сут/10 лет.

Климатические условия данной территории формируются в основном под влиянием крупномасштабной западной атмосферной циркуляции, обеспечивающей перенос тепла и влаги с акватории Атлантического океана, и эпизодическими вторжениями арктического воздуха. Межгодовые колебания во временных рядах зимней температуры воздуха статистически тесно связаны с индексами Арктического колебания (далее — АО) и Северо-Атлантического колебания (далее — NAO). В Карелии индекс NAO объясняет 36–40% колебаний температуры воздуха в зимние месяцы (декабрь–март) ( $r > 0.6$ ;  $p < 0.001$ ) (Efremova et al., 2013). Индексы АО и NAO демонстрируют статистически значимый положительный сдвиг режима с зимы 1988/89 г. (Rodionov, Overland, 2005; North et al., 2013; Jaagus et al., 2017).

Расчёты с помощью теста Родионова показали, что положительный сдвиг зимней приземной температуры воздуха произошёл в 1988/89 г., разделив исследуемый период на два режима: с 1950 по 1988 и с 1989 по 2021 гг. Сдвиг зимней температуры наблюдался на всех рассматриваемых метеостанциях, за исключением МС Пудож, расположенной на восточном берегу Онежского озера. На рис. 2, а представлены примеры межгодовой изменчивости и режим сдвига средней зимней температуры воздуха для МС Петрозаводск (синяя линия) и МС Сегежа (оранжевая линия), а на рис. 2, б — сдвиг в количестве суток за зимний период среднесуточной температуры  $< -10\text{ }^{\circ}\text{C}$  на МС Сортавала (синяя линия) и МС Калевала (оранжевая линия).

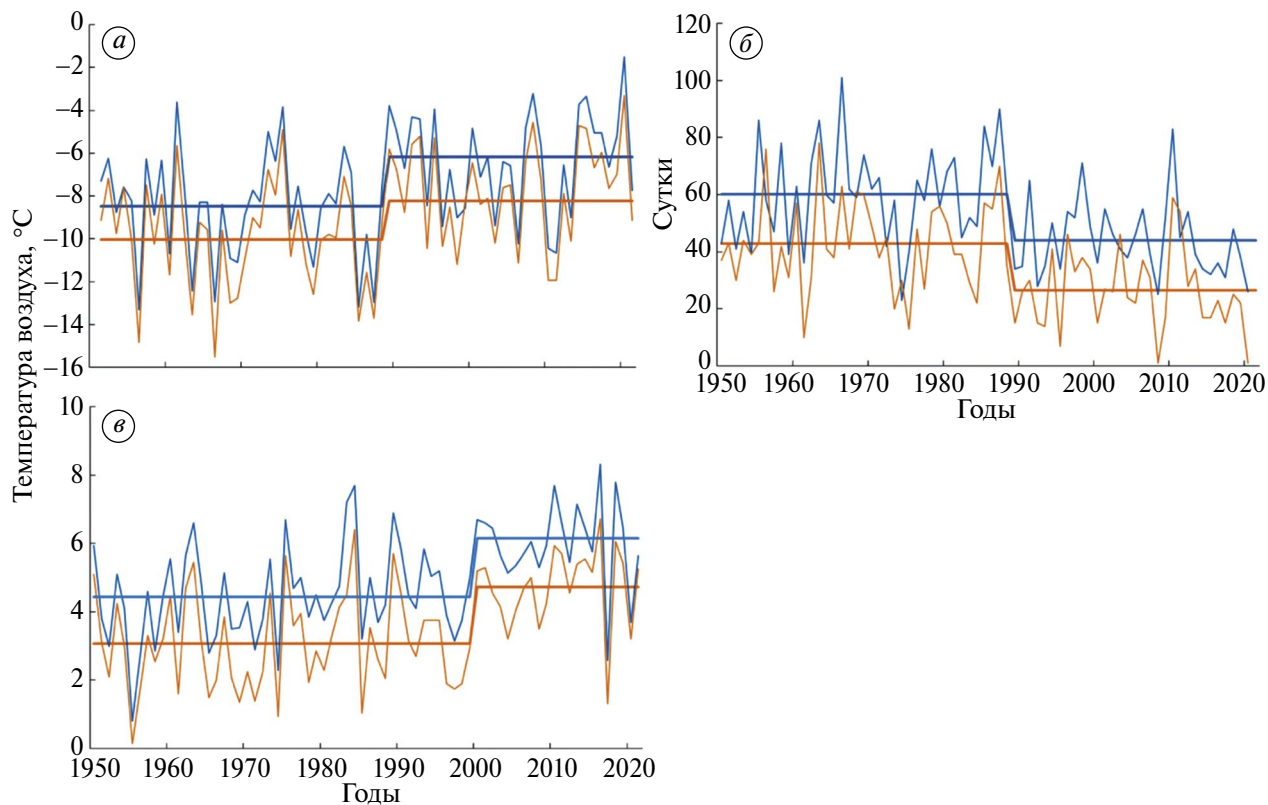
В отличие от зимней температуры воздуха резкий сдвиг весенней температуры (апрель–май) по данным восьми метеостанций произошёл весной 2000 г. Сдвиг среднегодовой температуры воздуха также обнаружен в 2000 г. Пример изменения весенней температуры на северной МС Паданы и южной МС Суоярви приведён

на рис. 2, в. Это соответствует результатам, полученным для 12 метеостанций в Эстонии, где смена режима зимней температуры воздуха наблюдалась зимой 1988/89 г., а в тёплое полугодие на 10 и более лет позже по сравнению с холодным полугодием (Jaagus et al., 2017).

**Ледовая фенология.** Появление озёрных ледовых образований происходит в период перехода температуры воздуха через  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Отрицательная сумма температур, необходимая для замерзания озёр, варьирует в зависимости от морфометрических характеристик озера, прежде всего от его глубины. Для очень мелких озёр достаточна сумма  $-20$  градусо-дней, в то время как для глубоких — более  $-150$ – $200$  градусо-дней (Ресурсы..., 1972), а, например, для Онежского озера — более  $-500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В средних и небольших бореальных озёрах Карелии стабильный ледяной покров обычно устанавливается в ноябре–декабре, а в крупных глубоководных озёрах Сегозеро и Онежское — в декабре–январе (рис. 3, а). Освобождение озёр ото льда происходит в течение мая (см. рис. 3, б). Все озёра за годы исследований имели стабильный ледяной покров, за исключением аномально тёплой зимы 2019/20 г., когда на Онежском озере замёрзли только северные заливы (Калинкина и др., 2021).

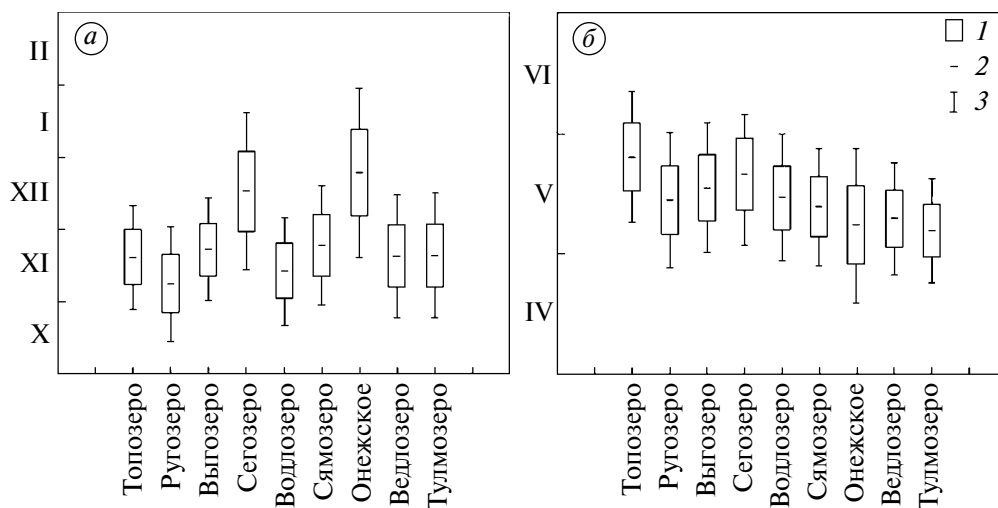
Наблюдающийся в последние десятилетия рост температуры воздуха, особенно в зимний период, привёл к изменению ледового режима озёр региона: ледостав стал устанавливаться в более поздние сроки, заканчиваться в более ранние, а следовательно, сократилась его продолжительность. Выполненный ранее анализ временных рядов ледовых событий исследуемых озёр Карелии за период 1950–2009 гг. (Efremova et al., 2013) свидетельствовал о сокращении продолжительности ледостава, но статистически значимый тренд для дат начала ледостава выявлен только в озере Сегозеро, а для продолжительности ледостава — в озере Сегозеро и Петрозаводской губе Онежского озера.

Анализ наблюдений ледовой фенологии этих озёр, дополненный 12-летними данными по 2021 г., показал, что сроки замерзания для всех озёр сместились к более поздним датам со скоростью  $+1.4$ – $4.1$  сут/10 лет (табл. 3). Линейный тренд статистически недостоверен только для самого северного озера Топозеро; для озёр Ругозеро и Выгорезо тренды статистически значимы на уровне  $p < 0.05$ , а для всех остальных озёр  $p < 0.01$ . На этих озёрах наблюдались наи-



**Рис. 2.** Средняя зимняя (декабрь–март) температура воздуха и сдвиг режима для МС Петрозаводск (синяя линия) и МС Сегежа (оранжевая линия) (а); количество суток за зимний период с температурой ниже  $-10^{\circ}\text{C}$  на МС Сортавала (оранжевая линия) и МС Калевала (синяя линия) (б); средняя весенняя (апрель–май) температура воздуха и сдвиг режима для МС Суоярви (синяя линия) и МС Паданы (оранжевая линия) (в); Горизонтальные линии — стационарные средние до и после смены режимов

**Fig. 2.** Average winter (December–March) air temperature and regime shift for weather station (WS) Petrozavodsk (blue line) and WS Segezha (orange line) (a); number of days during the winter period with temperature below  $-10^{\circ}\text{C}$  at WS Sortavala (orange line) and WS Kalevala (blue line) (b); average spring (April–May) air temperature and regime shift for WS Suoyarvi (blue line) and WS Padany (orange line) (v); Horizontal lines — stationary averages before and after regime shift



**Рис. 3.** Интерквартильный размах (1); средние (2) и экстремальные значения (3) дат замерзания озёр (а); и очищения озёр ото льда (б) за 1950–2021 гг. Порядок озёр слева направо соответствует уменьшению их широты с севера на юг

**Fig. 3.** Interquartile range (1), mean (2) and extreme (3) values of lake freezing dates (a) and lake ice breaking dates (b) for 1950–2021. The order of lakes from left to right corresponds to a decrease in their latitude from north to south

меньшие темпы задержания сроков начала ледостава по сравнению с другими озёрами. Наиболее быстрыми темпами сроки установления ледостава смещаются в крупных глубоководных озёрах Онежском и Сегозеро со скоростью +3.1 и +4.1 сут/10 лет соответственно. Выполненный анализ линейных трендов за период 1976–2021 гг. показал, что скорость смещения дат замерзания увеличилась на всех озёрах, но на северных озёрах (Топозеро, Ругозеро, Выгозеро) тренды незначимы (см. табл. 3). На остальных озёрах в этот период скорость смещения сроков начала ледостава составила +3.2–6.2 сут/10 лет.

Очищение озёр Карелии ото льда, как правило, происходит в мае и зависит от солнечной энергии, поступающей на поверхность озера весной, и, следовательно, определяются главным образом зональными факторами (см. рис. 3, б). Анализ временных рядов дат очищения озёр ото льда показал, что на всех озёрах наблюдается более раннее окончание ледостава, и значимые тренды характерны для всех озёр почти с одинаковой скоростью –1.1–1.6 сут/10 лет, за исключением Петрозаводской губы Онежского озера, где очищение происходит с большей скоростью (–2.0 сут/10 лет). Например, на оз. Сегозеро дата очищения ото льда сдвинулась с конца мая на середину месяца, а для оз. Ведлозеро — с середины мая на его начало. За период 1976–2021 гг. скорость смещения дат очищения озёр ото льда к более ранним значениям увеличивалась до –1.8–3.7 сут/10 лет с наибольшими значениями для озёр Сегозеро и Онежское.

В результате более позднего замерзания и более раннего очищения озёр ото льда продолжительность ледостава за период 1950–2021 гг. на исследуемых озёрах Карелии сокращалась со скоростью –2.5–6.1 сут/10 лет (см. табл. 3), а за период 1976–2021 гг. — со скоростью –3.5–10.1 сут/10 лет. Наименьшие скорости сокращения продолжительности ледостава отмечены для северных озёр Топозеро и Выгозеро, наибольшая — в крупных глубоководных озёрах Сегозеро и Онежское, которым требуется больше времени для охлаждения осенью и соответственно большая сумма зимних отрицательных температур для образования льда зимой. Таким образом за семидесятилетний период продолжительность ледостава на исследуемых озёрах Карелии сократилась в среднем на 15–25 сут, а для Онежского озера и оз. Сегозеро — на 35–40 сут, причём более позднее замерзание озёр вносит больший вклад в сокращение ледостава по срав-

нению с более ранним очищением озёр ото льда. Если полученные результаты анализа трендов временных рядов дат ледовой фенологии за 1950–2009 гг. (Efremova et al., 2013) показали значимые тренды ( $p < 0.05$ ) только для замерзания оз. Сегозеро и продолжительности ледостава озёр Сегозеро и Онежское, то дополненные по 2021 г. временные ряды за этот период продемонстрировали лишь один незначимый тренд для замерзания самого северного в нашей выборке озера Топозеро.

Сроки ледовых явлений на озёрах разных регионов мира наблюдались и записывались в течение десятилетий, а на некоторых водоёмах даже столетий (Sharma et al., 2016). В работе (Magnuson et al., 2000) обобщены и проанализированы временные ряды ледовой фенологии за 1855–1995 гг. для 20 озёр, расположенных в Северном полушарии. Это исследование показало, что даты замерзания озёр за столетие стали на 5.8 дня позже, а даты схода льда — на 6.5 дня за столетие раньше, что объяснялось в основном изменением климата из-за сопутствующего повышения температуры воздуха. В дальнейшем исследовании (Benson et al., 2012) эти данные дополнены данными по 2004 г. и отмечено, что в последние 30 лет лёд на озёрах устанавливался позже со скоростью 1.6 сут/10 лет, а разрушался раньше со скоростью 1.9 сут/10 лет, и продолжительность ледостава сокращалась со скоростью 4.3 сут/10 лет.

Sharma et al., 2021 расширили базу данных, используемую Magnuson et al., 2000 и Benson et al., 2012, дополнив её 40 озёрами и продлив до 2019 г. Проведённый анализ трендов ледовой фенологии показал, что с учётом добавленных данных наблюдалось ещё более быстрое сокращение продолжительности ледостава. В частности, даты появления льда запаздывали на 11 дней за столетие, даты схода льда были раньше на 6.8 дня за столетие, а продолжительность ледостава сократилась на 17 дней за столетие (Sharma et al., 2021). Однако за последние 25 лет эти озёра теряли ледяной покров экстремально быстро, средний тренд сокращения продолжительности ледостава для 60 озёр за период 1992–2016 гг. составил 10.6 сут/10 лет, что в шесть раз быстрее по сравнению с предыдущей четвертью века (Sharma et al., 2021). Vasu et al., 2024, используя данные натуральных наблюдений 2499 озёр в Северном полушарии за 1971–2020 гг., пришли к выводу, что за этот период продолжительность ледостава на озёрах сокращалась в среднем со скоростью 9 дней за десятилетие.

**Таблица 3.** Оценки линейного тренда временных рядов дат замерзания, очищения ото льда и продолжительности ледостава за период 1950–2021 гг. и 1976–2021 гг. на озёрах Карелии;  $b$  — коэффициент линейного тренда (сутки/10 лет),  $r^2$  — вклад тренда в дисперсию,  $p$  — уровень значимости

**Table 3.** Estimates of the linear trend of ice freezing and breaking dates, and ice duration for the periods 1950–2021 and 1976–2021 on the lakes of Karelia;  $b$  is the linear trend coefficient (days/10 years),  $r^2$  is the contribution of the trend to the variance,  $p$  is the significance level

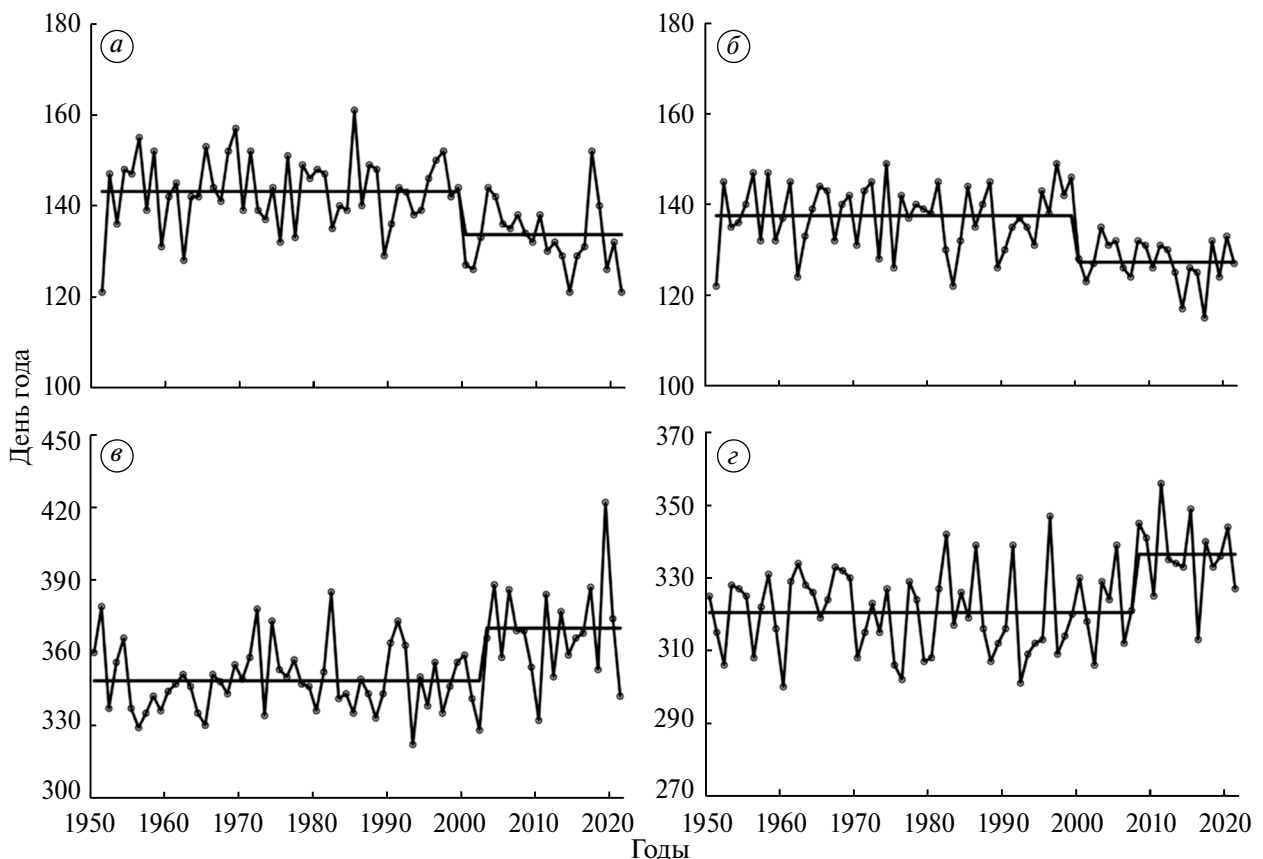
Название	Параметры	1950–2021			1976–2021		
		$b$	$r^2$	$p$	$b$	$r^2$	$p$
Топозеро	Замерзание	+0.821	0.0233	0.2036	+2.368	0.0807	0.0557
	Очищение ото льда	–1.585	0.1524	0.0008	–1.819	0.0979	0.0343
	Продолжительность ледостава	–2.606	0.1257	0.0026	–3.544	0.1033	0.0294
Ругозеро	Замерзание	+1.676	0.0834	0.0139	2.609	0.0718	0.0718
	Очищение ото льда	–1.500	0.1241	0.0026	–3.052	0.2396	0.0006
	Продолжительность ледостава	–3.410	0.1939	0.0001	–5.708	0.2194	0.0012
Выгозеро	Замерзание	+1.349	0.0659	0.0307	+2.056	0.0527	0.1248
	Очищение ото льда	–1.161	0.0858	0.0125	–2.630	0.2091	0.0014
	Продолжительность ледостава	–2.488	0.1166	0.0036	–4.642	0.1602	0.0058
Сегозеро	Замерзание	+4.088	0.2610	0.0000	+6.133	0.2369	0.0006
	Очищение ото льда	–1.398	0.0983	0.0073	–3.684	0.3565	0.0000
	Продолжительность ледостава	–6.055	0.3126	0.0000	–9.987	0.3670	0.0000
Водлозеро	Замерзание	+2.176	0.1571	0.0006	+3.203	0.1286	0.0144
	Очищение ото льда	–1.514	0.1446	0.0010	–3.301	0.3210	0.0000
	Продолжительность ледостава	–3.905	0.2677	0.0000	–6.504	0.3036	0.0000
Сямозеро	Замерзание	+1.940	0.1033	0.0059	+4.749	0.2073	0.0015
	Очищение ото льда	–1.109	0.0975	0.0076	–2.742	0.2478	0.0004
	Продолжительность ледостава	–3.295	0.1672	0.0004	–7.954	0.3391	0.0000
Онежское	Замерзание	+3.149	0.1352	0.0015	+5.551	0.1753	0.0038
	Очищение ото льда	–2.036	0.1860	0.0002	–4.473	0.3233	0.0000
	Продолжительность ледостава	–5.185	0.2257	0.0000	–10.05	0.3402	0.0000
Ведлозеро	Замерзание	+2.197	0.1248	0.0027	+3.213	0.0975	0.039
	Очищение ото льда	–1.489	0.1869	0.0002	–2.226	0.1824	0.0038
	Продолжительность ледостава	–3.396	0.1981	0.0001	–5.204	0.1846	0.0036
Тулмозеро	Замерзание	+2.550	0.1156	0.0035	+5.595	0.1836	0.0030
	Очищение ото льда	–1.426	0.1973	0.0000	–2.440	0.2585	0.0003
	Продолжительность ледостава	–3.494	0.2038	0.0001	–6.614	0.2773	0.0002

Для выборки средняя скорость сокращения продолжительности ледостава за период 1971–2020 гг. составила 6 суток за десятилетие с максимальными скоростями для Петрозаводской губы Онежского озера (8.3 сут) и Сегозеро (7.0 сут) и минимальными — для оз. Топозеро (3.2 сут) и оз. Выгозеро (3.8 сут). Темпы сокращения ледостава ускорились за последние десятилетия, для рассматриваемых озёр средняя скорость сокращения ледостава за период 1990–2021 гг. составляла уже 10 сут за десятилетие с максимальными значениями на Онежском озере (15.8 сут) и оз. Сегозеро (14 сут).

Расчёты с использованием теста Родионова показали, что резкие изменения в среднем в датах очищения ото льда исследуемых озёр произошли в сторону уменьшения в 1999 и 2000 гг., за исключением Петрозаводской губы Онежского озера (2007), что соответствует сдвигу в увеличении

весенней температуры воздуха. Пример для озёр Сегозеро и Водлозеро приведён на рис. 4, *а–б*. В датах начала ледостава сдвиг не наблюдался на северных озёрах Топозеро, Ругозеро и Выгозеро; на озёрах Сегозеро, Водлозеро и Онежском сдвиг произошёл в сторону увеличения в 2003 г., а на южных озёрах Сямозеро, Ведлозеро, Тулмозеро — в 2008 г. (см. рис. 4, *в–г*).

Анализ дат замерзания озёр (Basu et al., 2024) показал точку резких изменений — 1989 г., а в датах очищения озёр — 1988 г., что соответствует глобальным климатическим сдвигам в 1980-х гг. (Reid et al., 2016). В работе (Lopez et al., 2019) определяли резкие изменения методом Родионова в датах разрушения льда 152 озёр Северного полушария с 1951 по 2014 гг. Выяснено, что чаще всего сдвиги происходили в 1998 и 1999 гг. (39%). Озёра со сдвигом в 1998 г. в основном расположены в США, в то время как финские озёра



**Рис. 4.** День года (от 1 января) очищения ото льда оз. Сегозеро (*а*); оз. Водлозеро (*б*). День года (от 1 января) начала ледостава Онежское озеро (*в*); оз. Сямозеро (*г*). Горизонтальные линии — стационарные средние до и после смены режимов

**Fig. 4.** Day of the year (from January 1) of ice clearing on Lake Segozero (*a*); Lake Vodlozero (*b*). Day of the year (from January, 1) of the beginning of ice formation on Lake Onega (*v*); Lake Syamozero (*g*). Horizontal lines — stationary averages before and after the change of regimes

показали резкие изменения в датах распада льда в основном в 1999 г. Следовательно, результаты проведённого анализа сдвига режима в датах очищения ото льда озёр Карелии близко соответствовали скандинавским озёрам.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный анализ временных рядов данных о температуре воздуха на 8 метеостанциях на территории Карелии свидетельствует об устойчивом потеплении с середины двадцатого столетия, за период (1950–2021) среднегодовая температура воздуха повышалась со скоростью 0.28–0.34 °C/10 лет, наибольшая скорость потепления за этот период отмечена в зимний период 0.41–0.54 °C/10 лет. В результате потепления климата и регионального повышения температуры воздуха на разнотипных озёрах Карелии за 1950–2021 гг. сроки замерзания озёр смещались к более поздним датам со скоростью +1.4–4.1 сут/10 лет, причём наименьшая скорость характерна для северных озёр, а наибольшая — для крупных глубоководных озёр (Онежского, Сегозеро). Даты очищения озёр ото льда сместились к более ранним значениям со скоростью –1.1–1.5 сут/10 лет. В результате продолжительность периода ледостава сократилась в среднем на 15–25 сут (особенно за счёт более позднего замерзания озёр), а для крупных озёр — Онежского и Сегозеро на 35–40 сут. Темпы сокращения продолжительности ледостава ускоряются в последние десятилетия, а крупные глубокие озёра наиболее чувствительны к климатическим изменениям и более подвержены потере ледяного покрова по сравнению с мелкими озёрами в том же регионе. Зимой 2019/20 г. впервые за время инструментальных наблюдений не замёрзло Онежское озеро (ледостав наблюдался только на северных заливах). Кроме того, наряду с изменениями продолжительности ледостава также происходят долгосрочные изменения общей толщины льда и состава снежно-ледяного покрова, увеличивается доля белого снежного льда по сравнению с кристаллическим (Zdorovenнова et al., 2025).

В ответ на потепление климата изменение ледовой фенологии может происходить не только постепенно, но и сравнительно резко, что и наблюдается в последние десятилетия и приводит к изменению физических, химических и биологических характеристик экосистем озёр. Использование анализа режимных сдвигов позволило обнаружить резкие изменения во вре-

менных рядах средней зимней температуры воздуха в 1988/89 г., весенней температуры воздуха и очищения озёр ото льда — в 1999/00 г. Раннее окончание ледостава может способствовать более раннему установлению термической стратификации, более продолжительному сезону открытой воды, более устойчивой стратификации и более высокой температуре поверхности воды. Изменения физической среды обитания в озере, в свою очередь, влияют на биологическую фенологию, при этом отмечаются сдвиги в цветении и биомассе фитопланктона, динамике популяции зоопланктона, а также нересте рыб.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках государственного задания Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (FMEN-2026-0011).

**Acknowledgments.** The work was carried out within the framework of the theme of the state assignment of Northern Water Problems Institute of Karelian Research Center of RAS (FMEN-2026-0011).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов // Электронный ресурс. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (Дата обращения: 16.03.2025).
- Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — мировой центр данных // Электронный ресурс. URL: <http://meteo.ru/data/temperature-precipitation/> (Дата обращения: 16.03.2025).
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 58 с.
- Гидрологические ежегодники. Бассейн Белого моря. Бассейн Балтийского моря. Т. 1. Вып. 0–3. Л.: Гидрометеиздат, 1950–1989.
- 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 2019/20 г. // Известия РАН. Сер. Географическая 2021. Т. 85. № 6. С. 888–899. <https://doi.org/10.31857/S2587556621060078>
- Озёра Карелии. Справочник / Ред. Н.Н. Филатов, В.И. Кухарев. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2013. 464 с.
- Ресурсы поверхностных вод. Карелия и Северо-Запад. Т. 2. Ч. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 525 с.

- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. СПб.: Росгидромет, 2022. 676 с.
- 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 Resources Research*. 2024. № 60. P. e2023WR036392. <https://doi.org/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) // *Climatic Change*. 2012. V. 112. P. 299–323. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0212-8>
- Efremova T.V., Pal'shin N.I.* Timing of Ice Phenomena in Water Bodies of Northwestern Russia // *Meteorology and Hydrology*. 2011. V. 36. № 8. P. 559–565. <https://doi.org/10.3103/S1068373911080085>
- Efremova T., Palshin N., Zdorovenov R.* Long-Term Characteristics of Ice Phenology in Karelian Lakes // *Estonian Journal of Earth Sciences*. 2013. V. 62. № 1. P. 33–41. <https://doi.org/10.3176/earth.2013.04>
- Filazzola A., Blagrove K., Imrit M., Sharma S.* Climate Change Drives Increases in Extreme Events for Lake Ice in the Northern Hemisphere // *Geophysical Research Letters*. 2020. № 47. E2020GL089608. <https://doi.org/10.1029/2020GL089608>
- Imrit M., Sharma S.* Climate Change Is Contributing to Faster Rates of Lake Ice Loss in Lakes Around the Northern Hemisphere // *Journ. Of Geophys. Research: Biogeosciences*. 2021. № 126. E2020JG006134. <https://doi.org/10.1029/2020JG006134>
- Jaagus J., Sepp M., Tamm T., Jarvet A., Mõisja K.* Trends and Regime Shifts in Climatic Conditions and River Runoff in Estonia During 1951–2015 // *Earth System Dynamics*. 2017. V. 8. P. 963–976. <https://doi.org/10.5194/esd-8-963-2017>
- Kirillin G., Leppäranta M., Terzhevik A., Granin N., Bernhard J., Engelhardt C., Efremova T., Golosov S., Palshin N., Sherstyankin P., Zdorovenova G., Zdorovenov R.* Physics of Seasonally Ice-Covered Lakes: A Review // *Aquatic Sciences*. 2012. V. 74. № 4. P. 659–682. <https://doi.org/10.1007/s00027-012-0279-y>
- Leppäranta M.* Freezing of Lakes and the Evolution of Their Ice Cover. Springer-Praxis, Heidelberg, Germany. 2015. 301 p.
- Liu Q., Wan S., Gu B.* A Review of the Detection Methods for Climate Regime Shifts // *Discrete Dynamic in Nature and Society*. 2016. № 3536183. P. 10. <https://doi.org/10.1155/2016/3536183>
- Lopez L.S., Hewitt B.A., Sharma S.* Reaching a Breaking Point: How Is Climate Change Influencing the Timing of Ice Breakup in Lakes Across the Northern Hemisphere? // *Limnology and Oceanography*. 2019. V. 64. № 6. P. 2621–2631. <https://doi.org/10.1002/lno.11239>
- 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. V. 289. P. 1743–1746. <https://doi.org/10.1126/science.289.5485.1743>
- North R.P., Livingstone D.M., Hari R.E., Köster O., Niederhauser P., Kipfer R.* The Physical Impact of the Late 1980s Climate Regime Shift on Swiss Rivers and Lakes // *Inland Waters*. 2013. V. 3. P. 341–350. <https://doi.org/10.5268/IW-3.3560>
- Palecki M.A., Barry R.G.* Freeze-Up and Break-Up of Lakes as an Index of Temperature-Changes During the Transition Seasons — A Case-Study for Finland // *Journ. Of Applied Meteorology and Climatology*. 1986. V. 25. № 7. P. 893–902. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1986\)025%3C0893:FUABUO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1986)025%3C0893:FUABUO%3E2.0.CO;2)
- Reid P.C., Hari R.E., Beaugrand G., Livingstone D.M., Marty C., Straile D., Barichivich J., Goberville E., Adrian R., Aono Y., Brown R., Foster J., Groisman P., Hélaouët P., Hsu H.H., Kirby R., Knight J., Kraberg A., Li J., Lo T.T., Myneni R.B., North R.P., Pounds J.A., Sparks T., Stübi R., Tian Y., Wiltshire K.H., Xiao D., Zhu Z.* Global Impacts of the 1980s Regime Shift // *Global Change Biology*. 2016. V. 22. P. 682–703. <https://doi.org/10.1111/gcb.13106>
- Rodionov S.* A Sequential Algorithm for Testing Climate Regime Shifts // *Geophys. Research Letters*. 2004. V. 31. L09204. <https://doi.org/10.1029/2004GL019448>
- Rodionov S., Overland J.E.* Application of a Sequential Regime Shift Detection Method to the Bering Sea Ecosystem // *ICES Journal of Marine Science*. 2005. V. 62. P. 328–332. <https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2005.01.013>
- Sharma S., Magnuson J.J., Batt R.D., Winslow L.A., Korhonen J., Aono Y.* Direct Observations of Ice Seasonality Reveal Changes in Climate over the Past 320–570 Years // *Scientific Reports*. 2016. V. 6 (1), 25061. <https://doi.org/10.1038/srep25061>
- Sharma S., Blagrove K., Magnuson J.J., O'Reilly C.M., Oliver S., Batt R.D., Magee M.R., Straile D., Weyhenmeyer G.A., Winslow L., Woolway R.I.* Widespread Loss of Lake Ice Around the Northern Hemisphere in a Warming World // *Nature Climate Change*. 2019. V. 9 (3). P. 227–231. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0393-5>
- 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, Shift-

ing Phenology, and More Extreme Events in Northern Hemisphere Lakes // *Journ. Of Geophys Research: Biogeosciense* 2021. V. 126. P. e2021JG006348. <https://doi.org/10.1029/2021JG006348>

Zdorovennova G., Efremova T., Novikova I., Erina O., Sokolov D., Denisov D., Fedorova I., Smirnov S., Pal-

shin N., Bogdanov S., Zdorovennov R., Huang W., Lep-paranta M. Contrasting Changes in Lake Ice Thickness and Quality Due to Global Warming in the Arctic, Temperate, and Arid Zones and Highlands of Eurasia // *Water*. 2025. V. 17. 365 p. <https://doi.org/10.3390/w17030365>

**Citation:** Efremova T.V., Belashev B.Z., Palshin N.I., Zdorovennova G.E., Bogdanov S.R., Zdorovennov R.E. The Impact of Climate Change on Ice Phenology of Different Types of Lakes in Karelia Based on Long-Term Observations (1950–2021). *Led I Sneg. Ice and Snow*. 2026, 66 (1): 105–120. [In Russian]. doi: 10.7868/S241237652601008

## Ice Phenology of Different Types of Lakes in Karelia Based on Long-Term Observations (1950–2021)

© 2026 T. V. Efremova<sup>a</sup>, B. Z. Belashev<sup>b</sup>, N. I. Palshin<sup>a</sup>, G. E. Zdorovennova<sup>a,#</sup>, S. R. Bogdanov<sup>a</sup>, R. E. Zdorovennov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia;

<sup>b</sup>Institute of Geology of the Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia

<sup>#</sup>e-mail:zdorovennova@gmail.com

Received June 30, 2025; revised September 24, 2025; accepted December 29, 2025

Time series of seasonal, annual air temperature and ice phenology records of 9 lakes of Karelia are analyzed to identify statistically significant trends and shifts in climate regimes during 1950–2021. The analysis of surface air temperature data at 8 weather stations indicates a persistent, stable warming of the regional climate of Karelia in all seasons of the year, but with higher values observed in winter and spring. It was found that there was a statistically significant trend in the ice-on dates of all lakes to later dates at a rate of +1.3–4.1 days/10 years, and the ice-off dates to earlier dates at a rate of –1.1–2.0 days/10 years. The duration of the ice cover decreased by an average of 15–25 days (especially due to the later ice-on data), and for large lakes Onega and Segozero by 35–40 days. Using the test analysis of regime shifts, we found evidence of abrupt changes in mean winter air temperature in 1988/89, the spring air temperature and ice-off of lakes in 1999/2000. The rate of ice cover loss has accelerated in recent decades. Large deep lakes are most sensitive to climate change and are more susceptible to ice cover loss than small lakes in the same region.

**Keywords:** lakes, ice phenology, air temperature, trend, shift regime, lakes of Karelia

### REFERENCES

- Automated Information System for State Monitoring of Water Bodies. Retrieved from: URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (Last access: March 16, 2025). [In Russian].
- Russian Institute of Hydrometeorological Information — World Data Center. Retrieved from: URL: <http://meteo.ru/> contacts (Last access: March 16, 2025). [In Russian].
- Vtoroy otsenochnyy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata I ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii.* The Second Assessment Report of Roshydromet on Climate Change and Its Consequences in the Russian Federation. Moscow: Roshydromet, 2014: 58 p. [In Russian].
- Gidrologicheskiye yezhegodniki. Basseyn Belogo morya.* Hydrological Yearbooks. White Sea Basin. Baltic Sea Basin. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1950–1989, 1: 0–3. [In Russian].
- Kalinkina N.M., Tekanova E.V., Efremova T.V., Pa’shin N.I., Nazarova L.E., Baklagin V.N., Zdorovennov R.E., Smirnova V.S. Response of the Onega Lake Ecosystem in the Spring–Summer Period to Abnormally High Air Temperatures in the Winter of 2019/20. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya.* Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series. 2021, 85 (6): 888–899. <https://doi.org/10.31857/S2587556621060078> [In Russian].
- Ozera Karelii. Spravochnik.* Lakes of Karelia. Handbook. Petrozavodsk: Publishing House Karelian Research Center, 2013: 464 p. [In Russian].

- Resursy poverkhnostnykh vod. Kareliya i Severo-Zapad.* Surface Water Resources. Karelia and the North-West. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1972, 2 (1): 525 p. [In Russian].
- Tretiy otsenochnyy doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii.* Third Assessment Report on Climate Change and Its Consequences in the Russian Federation. St. Petersburg: Roshydromet, 2022: 676 p. [In Russian].
- 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 Resources Research*. 2024, 60: e2023WR036392. <https://doi.org/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). *Climatic Change*. 2012, 112: 299–323. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0212-8>
- Efremova T.V., Pal'shin N.I.* Timing of Ice Phenomena in Water Bodies of Northwestern Russia. *Meteorology and Hydrology*. 2011, 36 (8): 559–565. <https://doi.org/10.3103/S1068373911080085>
- Efremova T., Palshin N., Zdorovenov R.* Long-Term Characteristics of Ice Phenology in Karelian Lakes. *Estonian Journal of Earth Sciences*. 2013, 62 (1): P. 33–41. <https://doi.org/10.3176/earth.2013.04>
- Filazzola A., Blagrove K., Imrit M., Sharma S.* Climate Change Drives Increases in Extreme Events for Lake Ice in the Northern Hemisphere. *Geophys. Research Letters*. 2020, 47: e2020GL089608. <https://doi.org/10.1029/2020GL089608>
- Imrit M., Sharma S.* Climate Change Is Contributing to Faster Rates of Lake Ice Loss in Lakes Around the Northern Hemisphere. *Journ. of Geophys. Research: Biogeosciences*. 2021, 126: e2020JG006134. <https://doi.org/10.1029/2020JG006134>
- Jaagus J., Sepp M., Tamm T., Jarvet A., Mõisja K.* Trends and Regime Shifts in Climatic Conditions and River Runoff in Estonia During 1951–2015. *Earth System Dynamics*. 2017, 8: 963–976. <https://doi.org/10.5194/esd-8-963-2017>
- Kirillin G., Leppäranta M., Terzhevik A., Granin N., Bernhardt J., Engelhardt C., Efremova T., Golosov S., Palshin N., Sherstyankin P., Zdorovenova G., Zdorovenov R.* Physics of Seasonally Ice-Covered Lakes: A Review. *Aquatic Sciences*. 2012, 74 (4): 659–682. <https://doi.org/10.1007/s00027-012-0279-y>
- Leppäranta M.* Freezing of Lakes and the Evolution of Their Ice Cover. Springer-Praxis. Heidelberg, Germany. 2015: 301 p.
- Liu Q., Wan S., Gu B.* A Review of the Detection Methods for Climate Regime Shifts // *Discrete Dynamic in Nature and Society*. 2016, 3536183: 10 p. <https://doi.org/10.1155/2016/3536183>
- Lopez L.S., Hewitt B.A., Sharma S.* Reaching a Breaking Point: How Is Climate Change Influencing the Timing of Ice Breakup in Lakes Across the Northern Hemisphere? // *Limnology and Oceanography*. 2019, 64 (6): 2621–2631. <https://doi.org/10.1002/lno.11239>
- 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. <https://doi.org/10.1126/science.289.5485.1743>
- North R.P., Livingstone D.M., Hari R.E., Köster O., Niederhauser P., Kipfer R.* The Physical Impact of the Late 1980s Climate Regime Shift on Swiss Rivers and Lakes. *Inland Waters*. 2013, 3: 341–350. <https://doi.org/10.5268/IW-3.3560>
- Palecki M.A., Barry R.G.* Freeze-Up and Break-Up of Lakes as an Index of Temperature-Changes During the Transition Seasons — A Case-Study for Finland. *J. Appl. Meteorol and Clim.* 1986, 25 (7): 893–902. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1986\)025%3C0893:FUABUO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1986)025%3C0893:FUABUO%3E2.0.CO;2)
- Reid P.C., Hari R.E., Beaugrand G., Livingstone D.M., Marty C., Straile D., Barichivich J., Goberville E., Adrian R., Aono Y., Brown R., Foster J., Groisman P., Hélaouët P., Hsu H.H., Kirby R., Knight J., Kraberg A., Li J., Lo T.T., Myneni R.B., North R.P., Pounds J.A., Sparks T., Stubi R., Tian Y., Wiltshire K.H., Xiao D., Zhu Z.* Global Impacts of the 1980s Regime Shift. *Glob. Change Biol.* 2016, 22: 682–703. <https://doi.org/10.1111/gcb.13106>
- Rodionov S.* A Sequential Algorithm for Testing Climate Regime Shifts. *Geophys. Research Letters*. 2004, 31: L09204. <https://doi.org/10.1029/2004GL019448>
- Rodionov S., Overland J.E.* Application of a Sequential Regime Shift Detection Method to the Bering Sea Ecosystem. *ICES Journal of Marine Science*. 2005, 62: 328–332. <https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2005.01.013>
- Sharma S., Magnuson J.J., Batt R.D., Winslow L.A., Korhonen J., Aono Y.* Direct Observations of Ice Seasonality Reveal Changes in Climate over the Past 320–570 Years. *Scientific Reports*. 2016, 6 (1): 25061. <https://doi.org/10.1038/srep25061>
- Sharma S., Blagrove K., Magnuson J.J., O'Reilly C.M., Oliver S., Batt R.D., Magee M.R., Straile D., Weyhenmeyer G.A., Winslow L., Woolway R.I.* Widespread Loss of Lake Ice Around the Northern Hemisphere in a Warming World. *Nature Climate Change*. 2019, 9 (3): 227–231. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0393-5>

- 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. *Journ. of Geophys. Research: Biogeosciense* 2021, 126: e2021JG006348.  
<https://doi.org/10.1029/2021JG006348>
- Zdorovennova G., Efremova T., Novikova I., Erina O., Sokolov D., Denisov D., Fedorova I., Smirnov S., Palshin N., Bogdanov S., Zdorovennov R., Huang W., Lepparanta M.* Contrasting Changes in Lake Ice Thickness and Quality Due to Global Warming in the Arctic, Temperate, and Arid Zones and Highlands of Eurasia. *Water*. 2025, 17: 365 p.  
<https://doi.org/10.3390/w17030365>