

УДК 551.583

ОСОБЕННОСТИ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Науменко М.А., Каретников С.Г.

ФГБУН «Институт озераведения Российской академии наук», Санкт-Петербург,

e-mail: naumenko@limno.org.ru

Статистический анализ изменений температуры воздуха в северной части Ладожского озера (метеостанция Сортавала) позволил детально проанализировать климатические изменения, за период с 1945 по 2015 гг., а также для двух периодов: до 1980 г. и после 1980 г. Сделаны оценки трендов среднегодовых температуры воздуха, изменения трендов для каждого месяца года, проанализированы тренды дат начала и конца периодов положительных и отрицательных температур, тренды суточной амплитуды и тренды экстремумов температуры воздуха. В первый период практически не было значимых трендов для разных периодов осреднения. Было подтверждено, что зимние изменения превышают летние. За 70-летний период времени отмечалось не постепенное (монотонное) увеличение температуры воздуха на севере Ладожского озера, а достаточно резкое (скачкообразное) с 1980-х годов по наше время. Во второй период значимое повышение температуры воздуха произошло в марте, апреле и мае. Изменения температуры теплого периода незначительны.

Ключевые слова: многолетние тренды температуры воздуха, продолжительность теплого и холодного периодов, Ладожское озеро

THE FEATURES OF MULTI-YEAR VARIATIONS OF AIR TEMPERATURE IN THE NORTH OF LAKE LADOGA

Naumenko M.A., Karetnikov S.G.

Institute of Limnology Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, e-mail: naumenko@limno.org.ru

Statistical analysis of the changes in air temperature in the northern part of Lake Ladoga (Sortavala meteorological station) allowed to analyze of climate change in detail, to determine changes in trends for each month of the year for the period from 1945 to 2015, and for two periods before and after 1980. In the first period there were virtually no significant trends for different periods of averaging. It was confirmed that the changes in winter exceed in summer ones. Significant trends in temperature especially in March and April are above the average. In contrast of this there is the small air temperature changes of the warm period.

Keywords: long-term temperature trends, the duration of warm and cold periods, Lake Ladoga

Внутривековая изменчивость температурного режима прибрежных районов Ладожского озера оказывает влияние на функционирование экосистемы озера, на её биотическую и абиотическую составляющие и является показателем изменений климата.

Современные климатические изменения на Северо-Западе Европейской части Российской Федерации были проанализированы в работах карельских учёных [2, 13], было показано, что в районе Онежского озера изменения средней годовой температуры для всех пунктов наблюдения были синхронны, а изменения в температурном режиме Карелии привели к смещению дат наступления климатических периодов года. Для территории России В.М. Мирвис [6] показала, что наиболее статистически значимым за последнее столетие является повышение температуры воздуха весной, а также в первой половине зимы, а также было продемонстрировано изменение продолжительности периодов вегетации

в XX веке [5, 7]. Оценка сезонных особенностей изменения климата в Северо-Европейском регионе выполнена Е.К. Ульянец с соавторами [12]. Анализ многолетних изменений температуры воздуха на земном шаре показал, что она изменяется не монотонно, есть периоды потепления и похолодания [3], более того, увеличение температуры очень неравномерно по сезонам [11]. На европейской части России за последние 30 лет (1976–2005 гг.) положительный тренд составил 0,4–0,48 °C/10 лет, что превышает величину роста глобальной температуры воздуха. Вообще говоря, климатические изменения в отдельном регионе во многом определяются не только глобальными процессами, но и местными физико-географическими условиями, что в полной мере относится к крупнейшему в Европе Ладожскому озеру. Оценка трендов только среднегодовой температуры воздуха данного региона не позволяет выявить структуру температурных вариаций внутри года от сезона к сезону, от месяца к месяцу.

Представляется очевидным, что статистические характеристики, в том числе величина тренда, зависят от периода осреднения, например, это было показано в [6]. В статье [9] обсуждался анализ изменений линейных трендов температуры воды при изменении масштабов осреднения в интервале от 1 до 20 суток. Наибольший коэффициент детерминации, описывающий 30–40% общей изменчивости, достигается при масштабе осреднения от 4 до 8 суток.

При статистических оценках в большинстве случаев прямо или косвенно используется среднее значение переменных, которое меняется в зависимости от выбора периода осреднения. По рекомендациям ВМО период, который может быть использован для климатических оценок, не должен быть менее 30 лет [14]. Целью настоящей работы являлось проведение детального анализа климатических изменений температурного режима севера Ладожского озера

на основе последовательного статистического анализа трендов от годового периода осреднения до выявления трендов в величинах экстремумов температуры воздуха и дат их возникновения. При этом необходимо использовать не только оценки трендов среднегодовых температуры воздуха, но также проанализировать тренды дат начала и конца периодов положительных и отрицательных температур, тренды среднемесячных значений температуры и её суточной амплитуды и тренды экстремумов [1]. Исходные данные и методические аспекты их обработки.

Для характеристики температурного режима прибрежной части Ладожского озера был подготовлен временной ряд минимальной, средней, максимальной ежедневных температур воздуха на метеорологической станции Сортавала, расположенной на северном побережье озера, за период с 1945 по 2015 гг.

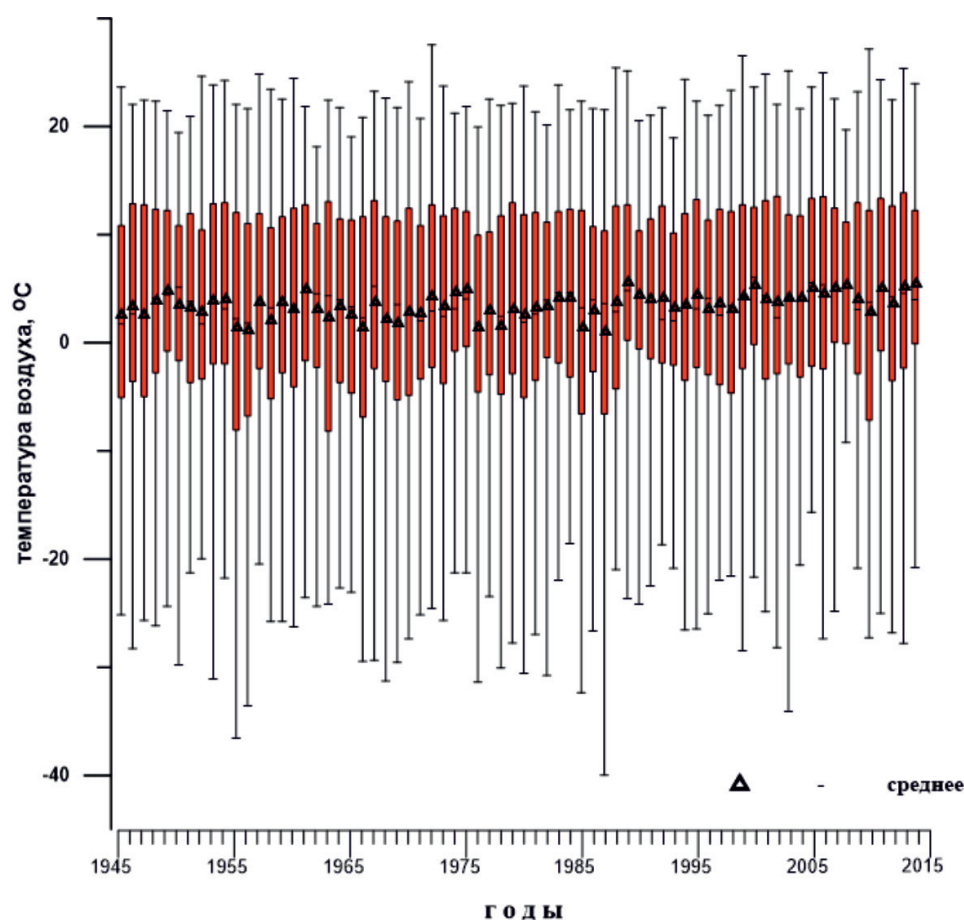


Рис. 1. Многолетние изменения характеристики (минимум, максимум, 25–75% квантили) температуры воздуха по м/с Сортавала

Многолетние изменения температуры воздуха приведены на рис. 1 в виде «ящичков с усами». Обращает на себя внимание то, что максимумы температуры, так же как и 75 % квартильные значения имеют меньшую изменчивость, чем 25 % квартили и минимум температуры за весь рассматриваемый период. Этот факт косвенно подтверждается в справочнике по климату СССР [10], где указывается, что наибольшие значения среднеквадратического отклонения за декаду отмечаются в январе – феврале (7,5–8,2 °C) в период минимальных температур, наименьшее – в июле (2,6–3,2 °C) в период максимальных температур. Для оценки климатических изменений в связи с рекомендациями Всемирной метеорологической организации [14] исходный ряд был разбит на две половины продолжительностью более 30 лет: 1) с 1945 по 1980 гг. и 2) с 1979 по 2015 гг. Для достижения совместимости ряды перекрывались на два года. На рис. 2 приведена разность среднесуточных значений температур воздуха между вторым и первым периодом. Жирной линией показано скользящее тридцатидневное среднее.

Очевидно, что второй период теплее, чем первый во все месяцы года.

Однородность рядов по среднему и дисперсии оценивалась при помощи критериев Стьюдента, Фишера, Левина и теста Брауна-Форсайта. Статистическая значимость

линейных трендов была определена при 5 % уровне значимости с использованием критерия Стьюдента. Критическое значение коэффициента детерминации R^2 , выраженное в процентах, для $n = 71$ равно 5,45 % и для $n = 36$ соответственно равно 10,8 % [4].

Анализ результатов

Статистический анализ многолетних изменений температуры воздуха выполнялся на основе анализа «вложенных» периодов осреднения и проводился в несколько этапов. На первом этапе выявлен значимый положительный линейный тренд среднегодовых температур воздуха за весь исследуемый период. Проверка ряда на однородность показала, что он не однороден: среднегодовая температура первой половины ряда меньше, чем соответствующая температура второго ряда на один градус. В табл. 1 и в последующих таблицах жирным шрифтом выделены значимо отличающиеся средние по критерию Стьюдента.

Сравнение среднегодовой температуры воздуха по м/с Сортавала за тридцатилетний период (с 1891 по 1920 гг.) (2,5 °C) [8] с значениями из табл. 1 свидетельствует, что температурный режим в конце девятнадцатого – начале двадцатого века на Ладожском озере был суровее, чем в конце двадцатого – начале двадцать первого века.

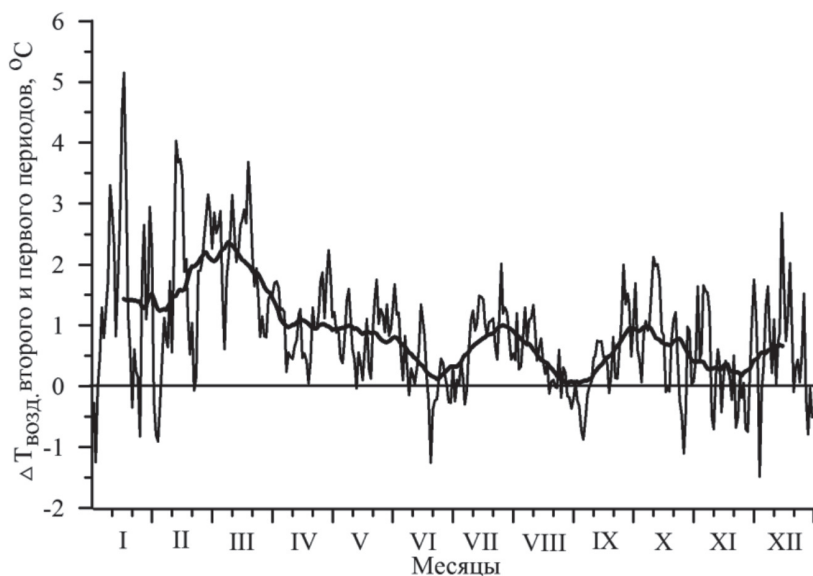


Рис. 2. Разность среднесуточных значений температуры воздуха по м/с Сортавала между периодами 1945–1980 гг. и 1979–2015 гг. Жирной линией показано скользящее тридцатидневное среднее

Таблица 1

Средние значения и характеристики линейных трендов среднегодовых температур воздуха по м/с Сортавала (°C/год)

Годы	Среднее, °C	Значимые тренды	Коэффициент детерминации R^2 , %
1945–1980	3,0	–	–
1979–2015	4,0	0,069	32,3
Весь ряд 1945–2015	3,55	0,029	21,6

Примечание. «–» означает отсутствие значимого тренда.

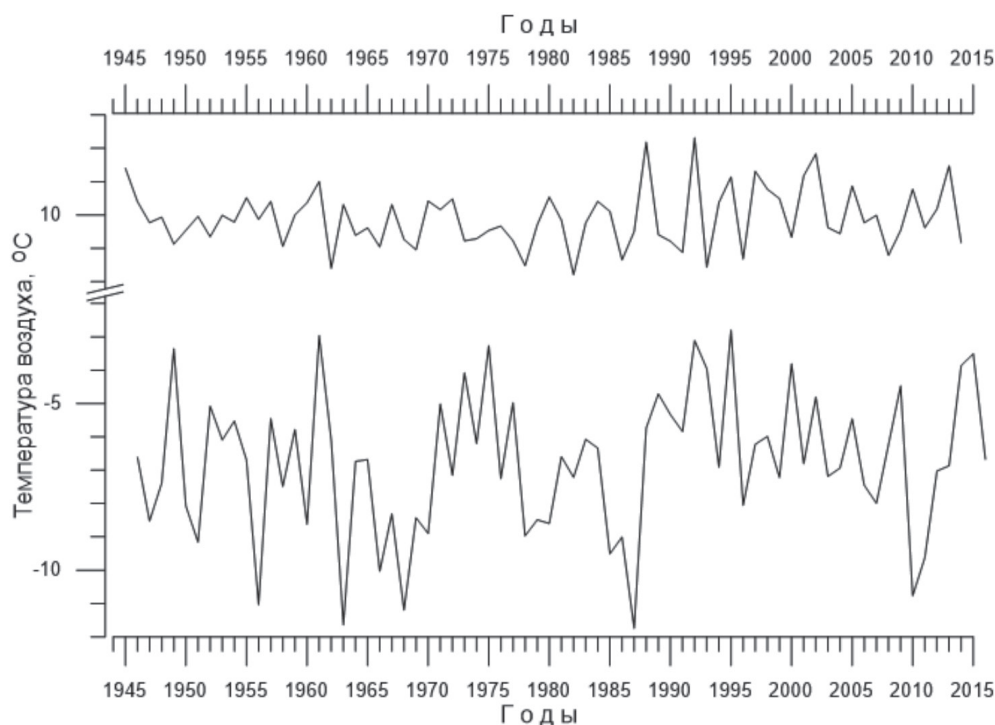


Рис. 3. Изменения средней положительной (верхняя кривая) и средней отрицательной (нижняя кривая) температуры воздуха по м/с Сортавала с 1945 по 2015 гг.

В первый период (1945–1980 гг.) тренд среднегодовых температур был незначим, тогда как за второй период (с 1979–2015 г.) тренд значим и в два раза больше по сравнению со средним за весь период наблюдений и составляет более 30% общей дисперсии процесса.

Временные изменения среднегодовых значений температуры не позволяют исследовать особенности изменения температурного режима в периоды с устойчивыми положительными и устойчивыми отрицательными температурами воздуха. Второй этап заключался в анализе параметров, характеризующих эти периоды. На рис. 3 показаны временные изменения средней положительной за год и средней отрицательной

за год температуры воздуха за исследуемый период. Обращает на себя внимание, что амплитуда отрицательных температур и степень их изменчивости значительно больше, чем положительных температур.

В первый период (1945–1980 гг.) нет значимых трендов во временных рядах ни одной из рассматриваемых характеристик. Устойчивый переход температуры воздуха через 0°C к отрицательным значениям происходит во второй декаде ноября. Нет значимых различий ни в дате перехода, ни в средней температуре для первого и второго периодов. Однако во второй период (1979–2015 гг.) обнаруживается положительный тренд в датах перехода к отрицательным значениям.

Таблица 2

Средние значения и характеристики линейных трендов периодов отрицательных и положительных температур воздуха по м/с Сортавала

Периоды	1945–1980	1979–2015			1945–2015	
Характеристики	Среднее	Среднее	Тренд	R ²	Тренд	R ²
Дата перехода к отрицат. темп.	12,11	17,11	0,70	14,8	0,20	5,7
Средняя отрицат. температура, °C	– 7,1	– 6,4	–	–	–	–
Продолжительность периода (–), сутки	145	133	– 0,93	16,7	– 0,39	11,3
Дата перехода к полож. темп.	07,04	31,03	–	–	– 0,20	8,4
Средняя полож. температура, °C	9,7	10,0	–	–	–	–
Продолжительность периода (+), сутки	220	232	1,0	16,3	0,40	11,5

Таблица 3

Средние значения и характеристики линейных трендов среднемесячных температур воздуха по м/с Сортавала (°C/год)

Периоды	Среднемесячные				1945–2015	
	1945–1980	1979–2015				
Месяцы	ср., °C	ср., °C	тренд	R ²	тренд	R ²
январь	– 9,6	– 8,2	–	–	–	–
февраль	– 9,8	– 8,2	–	–	–	–
март	– 5,6	– 3,6	–	–	0,059	14,9
апрель	1,3	2,4	–	–	0,027	11,5
май	8,1	9,0	–	–	0,026	12,0
июнь	13,8	14,1	–	–	–	–
июль	16,4	17,3	0,056	12,1	0,026	10,0
август	14,9	15,2	0,052	20,3	–	–
сентябрь	9,5	10,1	0,065	22,8	–	–
октябрь	3,8	4,6	–	–	–	–
ноябрь	– 1,16	– 0,93	–	–	–	–
декабрь	– 6,0	– 5,23	–	–	–	–

Продолжительность периода с отрицательными температурами, так же, как и периода с положительными температурами, для двух половин ряда указывает на неоднородность всего ряда и уменьшение периода отрицательных температур со скоростью около суток в год с 1979 по 2015 г., но с небольшим коэффициентом детерминации. С такой же скоростью увеличивается продолжительность периода положительных температур при неизменности средней температуры этого периода. Во второй половине ряда наступление устойчивого перехода через 0 °C в сторону положительных температур происходит раньше, чем в первой половине: в конце марта, а не в первой декаде апреля.

Следующий этап – это анализ изменчивости среднемесячных температур воздуха для конкретизации существования устойчивых (значимых) трендов в этом временном интервале и элиминирования годового хода температуры воздуха.

Тренды, определенные по среднемесячным температурам воздуха, для всего периода (с 1945 по 2015 гг.) были значимы для трех весенних месяцев (март, апрель, май) (табл. 3). Наибольшая величина тренда отмечалась для марта и равна 0,059 °C/год.

В первой половине (с 1945 по 1980 гг.) исследуемого периода тренды были незначимы так же, как и за весенние месяцы второго периода. Однако значимые тренды в июле – августе и сентябре – ноябре за второй период превышали 0,06 °C/год (табл. 3).

Неоднородность среднемесячных температур для весенних месяцев является важной особенностью временных рядов, указывающей на произошедшую перестройку во второй половине исследуемого периода с тенденцией на увеличение весенних температур воздуха на севере Ладожского озера.

Для двух половин исследуемого периода были рассчитаны коэффициенты вариации среднемесячных температур. Как в первый, так и во второй период наибольшие коэф-

коэффициенты вариации имеют место в месяцы перехода температуры воздуха через 0°C весной и осенью (рис. 4). Однако во второй период (1979–2015 гг.) весной возникновение максимума произошло на месяц раньше по сравнению с первым периодом.

Анализ суточных амплитуд температур воздуха для каждого месяца на м/с Сортавала указывает на то, что в первой

половине исследуемого ряда (с 1945 по 1980 гг.) тренды были незначимы, однако с января по август ряды не однородны, кроме двух месяцев: апреля и мая (табл. 4). Амплитуды имеют тенденцию к уменьшению. Во второй половине ряда скорость уменьшения амплитуды колеблется от 0,04 до 0,08 $^{\circ}\text{C}/\text{год}$ и может объяснять от 17 до 40 % дисперсии.

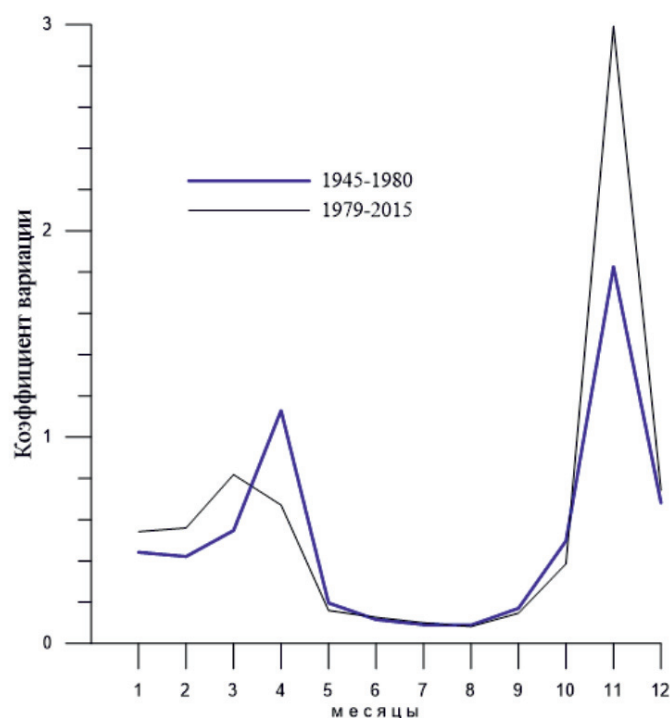


Рис. 4. Временной ход коэффициента вариации для двух периодов

Таблица 4

Средние значения и характеристики линейных трендов суточных амплитуд температур воздуха по м/с Сортавала ($^{\circ}\text{C}/\text{год}$)

	Среднемесячные				Весь ряд 1945–2015	
	1945–1980	1979–2015				
Месяцы	ср., °C	ср., °C	тренд	R ²	тренд	R ²
январь	7,3	6,1	– 0,087	30,2	– 0,033	18,4
февраль	7,7	6,9	– 0,076	23,3	– 0,024	8,7
март	9,7	7,8	–	–	– 0,048	15,9
апрель	8,2	8,5	–	–	–	–
май	10,4	10,2	– 0,059	22,9	–	–
июнь	10,5	9,5	– 0,049	18,0	– 0,022	14,3
июль	9,7	9,1	– 0,039	17,1	– 0,018	11,6
август	8,0	7,4	– 0,041	41,9	– 0,017	27,0
сентябрь	7,5	7,3	–	–	–	–
октябрь	5, 5	5,1	–	–	–	–
ноябрь	4,5	4,3	– 0,043	17,4	–	–
декабрь	6,1	5,6	– 0,085	29,3	–	–

Таблица 5

Средние значения и характеристики линейных трендов минимальных среднесуточных температур воздуха по м/с Сортавала (°C/год)

	Минимальные				Весь ряд 1945–2015	
	1945–1980			1979–2015		
Месяцы	ср., °C	тренд	R ²	ср., °C	тренд	R ²
январь	– 22,8	– 0,186	15,6	– 22,7	–	–
февраль	– 20,3	–	–	– 19,4	–	–
март	– 16,6	–	–	– 11,4	0,13	28,0
апрель	– 5,11	–	–	– 3,4	0,045	8,1
май	2,1	–	–	2,7	–	–
июнь	8,0	–	–	8,5	–	–
июль	11,7	–	–	12,3	–	–
август	9,83	–	–	10,20	–	–
сентябрь	3,79	–	–	4,46	–	–
октябрь	– 3,2	–	–	– 2,48	–	–
ноябрь	– 10,2	–	–	– 10,44	–	–
декабрь	– 19,5	–	–	– 17,47	–	–

Таблица 6

Средние значения и характеристики линейных трендов максимальных среднесуточных температур воздуха по м/с Сортавала (°C/год)

	Максимальные				Весь ряд 1945–2015	
	1945–1980	1979–2015				
Месяцы	ср., °C	ср., °C	тренд	R ²	тренд	R ²
январь	0,1	1,4	–	–	0,030	5,8
февраль	– 0,02	0,7	–	–	–	–
март	2,4	3,0	–	–	–	–
апрель	6,8	8,8	–	–	0,043	13,6
май	15,3	16,3	–	–	0,037	9,2
июнь	19,9	20,3	–	–	–	–
июль	21,9	21,9	–	–	–	–
август	19,7	20,5	–	–	0,028	7,7
сентябрь	15,2	15,3	0,068	11,9	–	–
октябрь	9,7	10,3	–	–	–	–
ноябрь	5,7	5,8	0,082	13,5	–	–
декабрь	1,9	2,4	–	–	–	–

Следующий этап анализа трендов с помощью анализа «вложенных» периодов осреднения был направлен на определение трендов экстремумов. Минимальные среднесуточные температуры увеличиваются, но лишь в весенние месяцы (март и апрель) ряды неоднородны (табл. 5).

Анализ изменений максимальных среднесуточных температур воздуха за каждый месяц показал их увеличение, но при отсутствии значимых трендов за оба исследуемых периода. Только в январе и апреле ряды неоднородны (табл. 6).

Гистограммы суточных экстремумов температуры воздуха (минимумов и максимумов) представлены для зимнего и лет-

него сезонов для периода до 1980 г. и периода после 1980 г. (рис. 5 и рис. 6).

В первый период (1945–1980 гг.), когда практически не ощущались климатические изменения, наиболее вероятное появление минимальных температур воздуха имело место с десятого января по первую декаду февраля, причем величины минимумов изменялись от –36 по –30 °C. Во второй период (1979–2015 гг.) практически не произошло временного сдвига даты максимумов, но их величины имеют тенденцию к увеличению (–33 – –24 °C).

Максимальные температуры воздуха в первый период возникали в конце июля и составляли 27–30 °C. Во второй период

гистограмма максимальных значений температур воздуха стала более полой, и, следовательно, максимумы могут возникать

в июле или в августе. Оценки максимумов могут изменяться в большем диапазоне, чем в первый период.

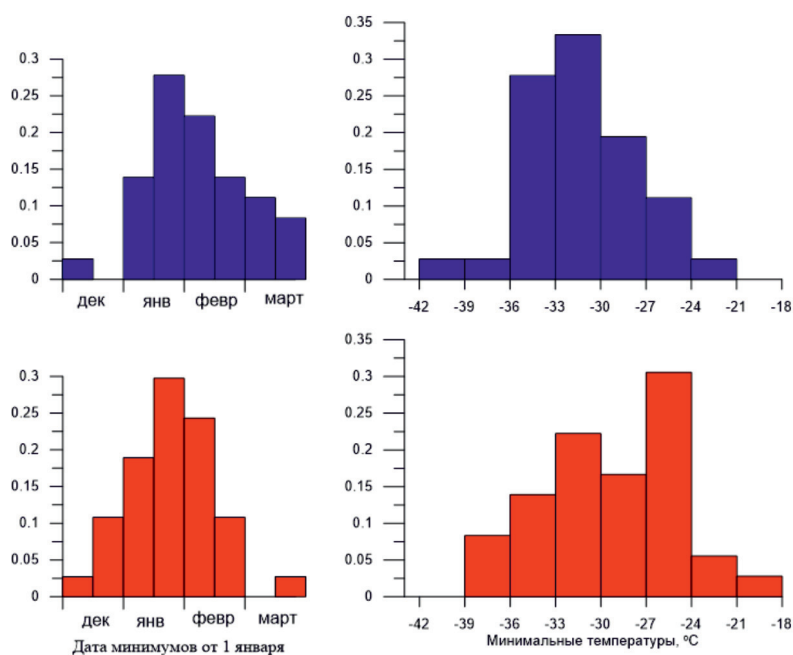


Рис. 5. Гистограммы распределения дат минимумов температуры воздуха и их значений за первый период (верх) и второй период (низ)

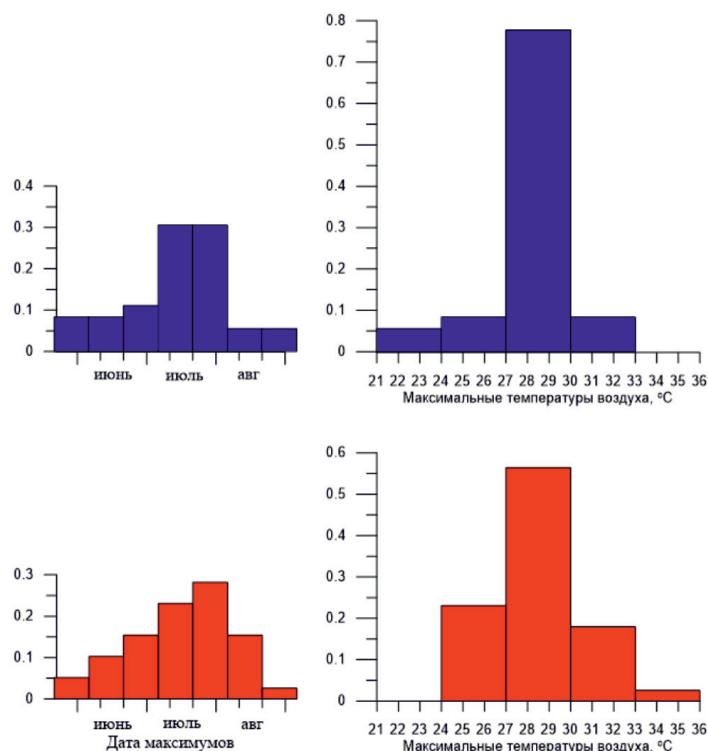


Рис. 6. Гистограммы распределения дат максимумов температуры воздуха и их значений за первый период (верх) и второй период (низ)

Выводы

Статистический анализ изменений температуры воздуха в северной части Ладожского озера (м/с Сортавала) позволил детально проанализировать климатические вариации, определить изменения трендов для каждого месяца года за период (с 1945 по 2015 гг., а также за два периода с 1945 по 1980 гг. и 1979 по 2015 гг.) и подтвердил, что зимние изменения превышают летние. Особенности климатических изменения температуры воздуха были сведены в итоговые таблицы. В первый период практически не было значимых трендов для разных периодов осреднения (от года до месяца).

За период с 1979 по 2015 гг. преобладают положительные тренды с ярко выраженным потеплением в холодное полугодие [15]. Значимые различия (неоднородность по среднему и дисперсии) указывают на произошедшее повышение температуры воздуха в марте, апреле, мае, начиная с 1980 г. Этот вывод подтверждают менее суровые ледовые условия Ладожского озера в начале XXI века. Ладожское озеро практически четыре года подряд (с 2013 по 2017 гг.) полностью не покрывалось льдом впервые за последние 75 лет.

Продолжительность периода устойчивых положительных температур увеличилась, но средняя температура этого периода практически не изменилась.

Подводя итог, можно с вероятностью не менее 95 % констатировать, что на севере Ладожского озера произошло значимое увеличение температуры воздуха в марте–апреле по отношению в предыдущему периоду 1945–1980 гг. За 70-летний период времени отмечалось не постепенное (монотонное) увеличение температуры воздуха на севере Ладожского озера, а достаточно резкое (скачкообразное) с 1980-х годов по наше время, что послужило основной причиной нарушения однородности рядов температуры воздуха в зимне-весенний период и не позволяет анализировать межгодовые колебания в рамках стационарности процесса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований 16–55–76025 ЭРА_а.

Список литературы

1. Воробьев В.И., Расторгуева А.А. Некоторые особенности многолетнего режима ежедневных значений максимальной и минимальной температуры воздуха в Санкт-Петербурге на рубеже веков. Учёные записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2012. – № 25. – С. 59–67.
2. Крупнейшие озёра-водохранилища Северо-Запада Европейской территории России. Отв. ред. Филатов Н.Н. – Петрозаводск, 2015. – 376 с.
3. Крышнякова О.С., Малинин В.Н. К анализу трендов в колебаниях температуры воздуха и осадков на Европейской территории России // Известия РГО. – 2009. – Т. 141, вып. 2. – С. 23–30.
4. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. – СПб., 2008. – 408 с.
5. Малинин В.Н., Гурьянов Д.А. Межгодовая изменчивость климатических сезонов в Санкт-Петербурге // Известия РГО. – 2015. – Т. 147, вып. 5. – С. 17–27.
6. Мирвис В.М. Закономерности изменения режима температуры воздуха на территории России в последнее столетие. В кн. Изменения климата и их последствия. – СПб.: Наука, 2002. – 269 с.
7. Мирвис В.М., Гусева И.П. Оценки изменения продолжительности безморозного периода вегетации на территории России и сопредельных государств в XX веке // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 1. – С. 106–113.
8. Молчанов И.В. Ладожское озеро. – М.-Л., 1945. – 558 с.
9. Науменко М.А., Гузиватый В.В., Каретников С.Г. О климатических трендах температуры поверхности воды Ладожского озера в безлёдный период. Доклады Академии наук. – 2006. – Т. 408, № 5. – С. 675–678.
10. Научно-практический справочник по климату СССР. Серия 3. Части 1–6. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 692 с.
11. Панин Г.Н., Соломонова И.В., Выручалкина Т.Ю. Климатические тенденции в средних и высоких широтах Северного полушария. Водные ресурсы. – 2009. – Т. 36, № 6. – С. 743–756.
12. Ульянец Е.К., Матрюков С.И., Червякова Н.В., Угрюмов А.И. Оценка сезонных особенностей изменения климата в Северо-Европейском регионе. Учёные записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2010. – № 13. – С. 70–82.
13. Филатов Н.Н., Назарова Л.Е., Сало Ю.А., Тержевик А.Ю. Оценки возможных изменений климата и их воздействие на некоторые характеристики гидрологического режима Ладожского и Онежского озёр. Водные ресурсы Европейского Севера России: итоги и перспективы исследований. – Петрозаводск, 2006. – С. 178–196.
14. IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 p.
15. O'Reilly C.M., Rowley R.J., Sharma S., Gray D.K., Hampton S.E., Read J.S., Schneider P., Lenters J.D., McIntyre P.B., Kraemer B.M., Weyhenmeyer G.A., Striale D., Dong B., Adrian R., Schmidt S.R., Allan M.G., Anneville O., Arvola L., Austin J., Bailey J.L., Naumenko M. et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. Geophysical Research Letters. – 2015. – Т. 42, № 24. – P. 10773–10781.