

Гидрометеорология и экология. 2025. № 79. С. 307—323.

Hydrometeorology and Ecology. 2025;(79):307—323.

Научная статья

УДК [551.524:551.583](470.2)

doi: 10.33933/2713-3001-2025-79-307-323

Оценка современных климатических изменений температуры воздуха в Северо-Западном Федеральном округе

Алексей Игоревич Груздев, Владимир Алексеевич Лобанов

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,
Россия, gruzdev2542022@mail.ru

Аннотация. В статье выполнено детальное исследование структуры временных рядов температуры воздуха за 1960—2024 гг. в Северо-Западном Федеральном округе. Для этого объединена информация из разных климатических архивов, увеличена продолжительность рядов и восстановлены пропуски наблюдений. Получены региональные зависимости средних многолетних температур от широты и долготы станции. На основе аппроксимации рядов наблюдений моделями ступенчатых изменений среднего значения установлено, что климатические изменения температуры произошли во второй половине XX века и дана количественная оценка этих изменений. Сделано предположение, что в холодный период основной причиной климатических изменений может являться усиление влияния Североатлантического колебания (западного переноса). Оценена корреляционная связь между температурой воздуха января и индексом Североатлантического колебания для различных частей территории.

Ключевые слова: климатические изменения, Северо-Западный федеральный округ, среднемесячная температура воздуха, индекс САК.

Благодарности: исследование выполнено в Лаборатории «Экология и климат» Российского государственного гидрометеорологического университета в рамках Государственного задания РГГМУ 2024 года (проект № FSZU-2023-0002, шифр «Климат-2»).

Для цитирования: Груздев А. И., Лобанов В. А. Оценка современных климатических изменений температуры воздуха в Северо-Западном Федеральном округе // Гидрометеорология и экология. 2025. № 79. С. 307—323. doi: 10.33933/2713-3001-2025-79-307-323.

Original article

Assessment of modern climate changes in air temperature in the Northwestern Federal District

Alexey I. Gruzdev, Vladimir A. Lobanov

Russian State Hydrometeorological University

Summary. The article provides a detailed study of the structure of time series of air temperature for 1960—2024 in the Northwestern Federal District. For this, data from three different climatic archives was

combined: the archive of the All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information — the World Data Center in Obninsk, from the website of the Meteorological Institute of the Kingdom of the Netherlands and the reference and information portal «Weather and Climate», as well as a comparison of these archives for a joint period to assess their reliability. The quality of this information was assessed (homogeneity, stationarity), the duration of the series was increased and observation gaps were restored. Long-term series of average monthly air temperature at 62 meteorological stations of the Northwestern Federal District of the Russian Federation are considered to obtain quantitative estimates of modern climatic changes. Regional dependences of average long-term temperatures on latitude and longitude of stations were obtained.

Based on approximation of the series of observations by models of stepwise changes in the mean value, it was established that climatic changes in temperature occurred in the second half of the 20th century and quantified these changes. To assess the statistical significance of the differences between the two means, the stationarity of the means according to the Student's *t*-test is evaluated. In January, there is minimal warming in the northwest (2 °C), and the maximum in the southwest (up to 4.3 °C). In July, all weather stations are warming from 0.8 °C in the southeast to 2.8 °C in the northeast. In transitional seasons, there is a meridional distribution with lows in the south and highs in the northeast. The *dT/CKO* ratio exceeds unity in the areas of greatest warming in all seasons.

It was assumed that the possible cause of climatic changes is the increased influence of NAO during the cold period. The correlation between January air temperature and the North Atlantic Oscillation index for different parts of the territory is estimated.

Keywords: Climate change, Northwestern Federal District, average monthly air temperature, NAO index.

Acknowledgments: the work was carried out in the laboratory “Ecology and Climate” of the Russian State Hydrometeorological University within the framework of the State Assignment of the RSHU (project №FSZU-2023-0002, code “Climate-2”).

For citation: Gruzdev A. I., Lobanov V. A. Assessment of modern climate changes in air temperature in the Northwestern Federal District. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(79):(307—323). doi: 10.33933/2713-3001-2025-79-307-323. (In Russ.).

Введение

Северо-Западный федеральный округ (СЗФО) имеет большое экономическое и политическое значение, так как в нем расположены важнейшие административные и промышленные центры страны, а также незамерзающий порт г. Мурманска, где берет начало Северный морской путь — стратегически важная транспортная магистраль России.

Несмотря на то, что преобладание естественной или антропогенной причины современного потепления климата пока однозначно не определено, но это потепление проявляется в температуре воздуха в разных частях Земли по-разному, в том числе и на территории Российской Федерации. В докладе [1] отмечается, что 2022 год для России в целом занял 5-е место в ранжированном по убыванию ряду среднегодовых температур с 1936 г., аномалия среднегодовой температуры воздуха (отклонение от среднего за 1991—2020 гг.) составила 0,87 °C. Температуры выше климатической нормы наблюдались практически на всей территории страны, кроме Саян.

Особенно быстро температура повышалась в северной части СЗФО, где за 30 лет (1991—2020 гг.) линейный рост среднегодовой температуры составил около 2,6 °C. При этом скорость изменения температуры зимой в 3 раза выше, чем летом [2]. В работах [3—6] считается, что антропогенная деятельность, с высокой вероятностью, не играет главенствующую роль в процессе второго потепления

Арктики, которое в значительной степени обусловлено естественными факторами. С другой стороны, в докладе МГЭИК [7] сделан противоположный вывод, что влияние человека является доминирующей причиной наблюдаемого потепления с середины XX столетия, и естественные причины не рассматриваются.

Для всей территории ЕТР максимальная интенсивность потепления за период с 1976 г. по 2020 г. отмечается зимой и летом: 0,72 и 0,46 °С/10 лет соответственно. Зимнее потепление приводит к возрастанию числа дней с переходом температуры воздуха через 0 °С, к таянию вечной мерзлоты [1, 8].

Наиболее значительные изменения произошли в статистике крупномасштабных летних волн тепла на ЕТР эпизодов длительностью от 5 дней со средней температурой в регионе выше 90 % процентиля. Если в период с 1961 г. по 1980 г. их наблюдалось всего три, то в период с 2001 г. по 2020 г. лишь одно лето 2004 г. прошло без таких волн [1].

В докладе [9] сделан вывод, что повышение температуры воздуха наблюдается в среднем на всей территории СЗФО. Так, за период с 1960 г. по 2020 г. средняя годовая температура воздуха в Мурманске и Сыктывкаре возросла примерно на 2 °С, а в Пскове — на 2,5 °С. Рост температуры отмечался как в теплый, так и в холодный периоды года, однако наиболее заметно он выражен в холодный период. Температура воздуха весенне-летнего периода растет со скоростью 0,4—0,6 °С за десятилетие [10]. В статье [11] показано, что рост средних годовых температур при сравнении средних значений двух периодов с 1900 г. по 1989 г. и с 1990 г. по 2017 г. составил для отдельных метеостанций СЗФО 1—1,5 °С.

В работе [12] выполнен анализ климатических изменений температуры воздуха в Ленинградской области и Санкт-Петербурге за последние 80—140 лет и выявлены её пространственные особенности многолетней динамики. Было установлено, что в конце 1980-х гг. произошло довольно резкое, ступенчатое повышение температур воздуха в среднем за апрель. В Ленинградской области за последние 70 лет наибольшее потепление на 1,8—1,9 °С наблюдается в Тихвинском, в Кингисеппском и Тосненском районах. Наименьшие значения роста температур за аналогичные периоды, не более 1,2 °С — в Выборгском и Бокситогорском районах (на северо-западе и юго-востоке). С конца 1970-х—начала 1980-х гг. в Санкт-Петербурге возникла тенденция к возрастанию средних годовых температур воздуха, а также в среднем за сезоны.

В исследовании [13] в Санкт-Петербурге за период с 1981 г. по 2013 гг. по срочным данным показано значительное сокращение зимнего периода (на 28 дней) за счет увеличения продолжительности других климатических сезонов.

Анализ перечисленных работ свидетельствует о повышении температуры воздуха на территории СЗФО, но оценки этих изменений варьируют в очень широких пределах: от десятых долей градуса Цельсия до 3—4 °С, что, возможно, обусловлено количеством и качеством данных наблюдений, методом оценки, рассматриваемым интервалом времени и другими причинами.

Целью настоящей работы является детальное исследование структуры временных рядов за интервал времени с 1960 г. по 2024 г., когда современные изменения климата стали наиболее ощутимы. В исследовании используются данные

из разных климатических архивов с оценкой их однородности, качества, восстановления пропусков наблюдений, а также оценки надежности установленных изменений и причин их обуславливающих.

Исходная информация

Северо-Западный федеральный округ (СЗФО) расположен на севере и северо-западе европейской части России и включает в свой состав 11 субъектов Российской Федерации. На рис. 1 приведены границы СЗФО с выбранными метеостанциями без включения в него отдельно находящегося эксклава — Калининградской области. Площадь рассматриваемой территории составляет 1671,8 тыс. кв. км.

Многолетние ряды наблюдений за среднемесячной температурой воздуха были получены из трех климатических архивов: архива Всероссийского

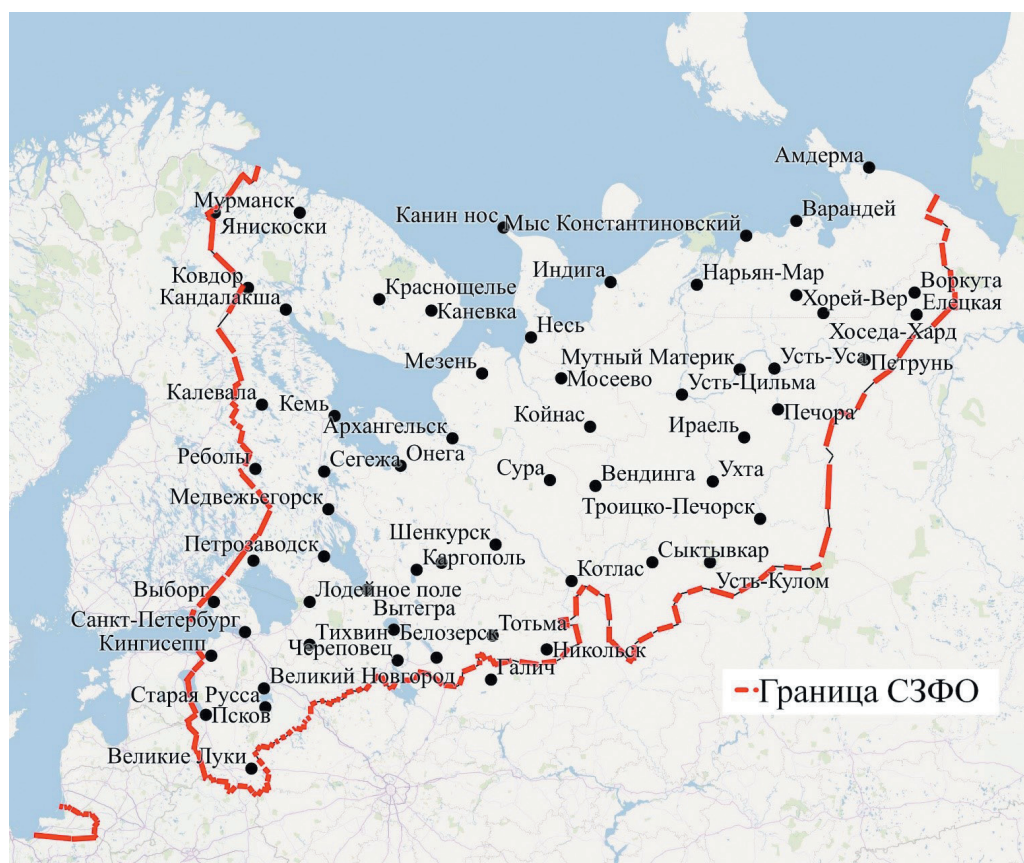


Рис. 1. Схема расположения метеостанций и границы СЗФО.

Fig. 1. Location of meteorological stations and the borders of Northwestern Federal District (NWFD).

научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных в г. Обнинске (ВНИИГМИ-МЦД), с сайта метеорологического института Королевства Нидерландов и справочно-информационного портала «Погода и климат».

Архив ВНИИГМИ-МЦД является надежным официальным источником информации, но имеет ряд недостатков: в нем отсутствуют данные наблюдений за последний период, имеются пропуски в данных и информация представлена только с основных метеостанций. Архив метеорологического института Королевства Нидерландов был использован для получения дополнительных станций на рассматриваемой территории, а архив портала «Погода и климат» — для получения информации за последние годы наблюдений.

Для оценки надежности информации в дополнительно использованных архивах, кроме архива ВНИИГМИ-МЦД, был проведен сравнительный анализ за совместный период наблюдений путем расчета коэффициентов корреляции (R). Для этой цели использованы многолетние ряды среднемесячных температур воздуха в средние месяцы каждого сезона за совместный период в среднем 100 лет для 45 метеостанций на территории СЗФО архива ВНИИГМИ-МЦД. При сравнении данных архива ВНИИГМИ-МЦД и сайта «Погода и Климат» получено, что на всех станциях $R = 0,99—1,0$ для температур апреля, июля и октября, а в январе на юго-востоке территории $R = 0,96—0,98$. Корреляция с данными архива метеорологического института Королевства Нидерланды составила $R = 0,99—1,0$ для рядов температуры января, а в апреле, июле и октябре на юго-западе территории $R = 0,97—0,98$. Зависимости с $R < 0,99$ были рассмотрены отдельно и выявлены отдельные 1—2 точки, отклоняющиеся от общей зависимости, связанные с ошибками в архиве сайта «Погода и Климат». Как было далее установлено, они не повлияли на общую тенденцию многолетнего изменения температуры, что обосновывает необходимость производить проверку однородности резко отклоняющихся экстремумов.

Примеры таких зависимостей ($B_1 = 0,98$, $B_0 = 0,40$) с отдельными отклоняющимися точками на метеостанции Петрунь (две точки: в 1995 г. отклонение на $3\text{ }^\circ\text{C}$ и в 1997 г. — на $10\text{ }^\circ\text{C}$) и Елецкая (в 1992 г. на $8\text{ }^\circ\text{C}$ и в 1995 г. на $3\text{ }^\circ\text{C}$) приведены на рис. 2. При исключении данных точек получены коэффициенты $B_1 = 0,999$, $B_0 = 0,02$, соответственно, так как практически равны $B_1 = 1,0$, $B_0 = 0,0$, то есть линия зависимости идет под углом 45° ($\tan = 1$) и выходит из начала координат, что свидетельствует об отсутствии систематических ошибок в рядах данных.

Для рядов наблюдений на остальных метеорологических станциях также систематических отклонений не было обнаружено ($B_1 = 1$, $B_0 = 0$).

В результате была сформирована региональная база данных (БД) среднемесячных температур воздуха на 62 метеостанциях с периодом наблюдений в среднем 105 лет, с различным начальным годом, изменяющимся от 1885 г. до 1955 г. и последним годом наблюдений 2024 г.

Расположение метеостанций показано на рис. 1, из которого видно, что они расположены достаточно равномерно по территории, что позволяет надежно осуществлять пространственные обобщения результатов. Высоты метеостанций

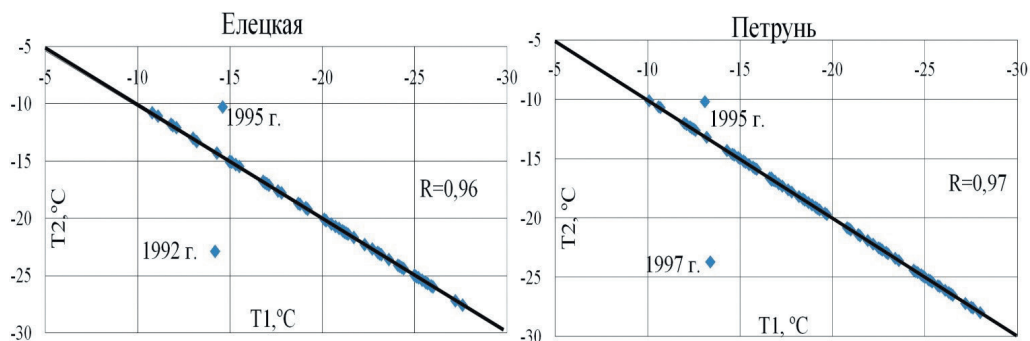


Рис. 2. Регрессионные зависимости между температурами воздуха двух архивов: Мирового центра данных (Т1) и портала «Погода и климат» (Т2) для среднемесячных температур января на метеостанциях Петрунь и Елецкая.

Fig. 2. Regression relationships between the air temperatures of two archives: the World Data Center (T1) and the portal «Weather and Climate» (T2) for the average monthly temperatures of January at the weather stations Petrun and Yeletskaia.

изменяются не в очень широком диапазоне: от 15 м над уровнем моря для метеостанций у побережий морей до 246 м на Кольском полуострове (метеостанция Ковдор).

Проведенная оценка качества исходной информации по статистическим критериям Диксона и Смирнова-Граббса [14] показала, что максимальные и минимальные экстремумы практически для всех рядов однородны. Для восстановления пропусков и приведения рядов наблюдений к практически общему многолетнему периоду была применена методика, изложенная, например, в работе [15], основанная на построении регрессионных зависимостей с рядами наблюдений на станциях-аналогах за совместный период. Обобщенные результаты восстановления приведены в таблице 1.

Таблица 1

Эффективность восстановления среднемесячных температур воздуха января, апреля, июля, октября

Efficiency of recovery of average air temperatures in January, April, July, October

Месяц	<i>m</i>	<i>n</i>	<i>N</i>	$\Sigma \epsilon$ °С	<i>R</i>	%
Январь	50	101	156	1,0	0,90—0,99	54
Апрель	29	91	110	0,5		20
Июль	48	100	167	0,5		68
Октябрь	33	95	118	0,4		25

Примечание: *m* — количество рядов, *n* — средняя продолжительность наблюдений в годах, *N* — средняя продолжительность рядов после восстановления, σ_{ϵ} — средняя квадратическая погрешность восстановленных данных в °С, *R* — средние коэффициенты корреляции уравнений, применяемых для восстановления, % — процент восстановленных лет по отношению к наблюдаемым.

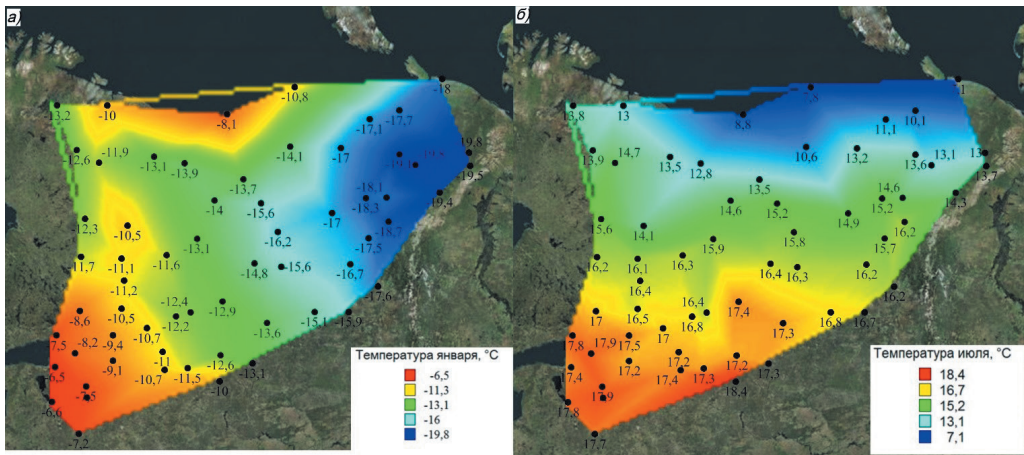


Рис. 3. Пространственные распределения средних многолетних температур января (а) и июля (б).

Fig. 3. Spatial distributions of average long-term temperatures in January (a) and July (b).

Установлено, что на юге и юго-западе СЗФО средние погрешности восстановления минимальны, а наибольшие имеют место на востоке региона, что обусловлено меньшей корреляционной связью с рядами-аналогами ($R = 0,90—0,94$) за все месяцы. Наибольшие стандартные погрешности имеют место в январе на восточных станциях, причем максимум составляет $1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. После восстановления рядов температуры воздуха января и июля период наблюдений на станциях западной и южной частей рассматриваемого региона увеличен более чем на 50 лет, что обусловлено высоким коэффициентом корреляции ($R = 0,97—0,99$) между исходным рядом и рядами-аналогами. В результате процедуры восстановления пропусков наблюдений и увеличения продолжительности рядов их средняя продолжительность составила 150 лет при максимальной 270 и 210 лет — на метеостанциях Санкт-Петербург, Архангельск, Петрозаводск и минимальной 90 лет — с началом ряда в 1935 г. на метеостанции Мыс Константиновский.

На основе таких продолжительных рядов были определены уточненные средние многолетние климатические характеристики и построены их пространственные распределения, которые приведены на рис. 3 для температур января (рис. 3 а) и июля (рис. 3 б). Для температур января (также и октября) имеет место их меридиональное распределение, а летом в июле (также в апреле) — широтное распределение температур, связанное с зональностью приходящей радиации.

Полученные на основе надежных продолжительных рядов наблюдений (1900—2024 гг.) для всего СЗФО зависимости (1)—(4) наглядно свидетельствуют о том, что в январе единственным фактором является долгота, что обуславливается распространением тепла с запада на восток от теплого Северо-Атлантического течения. В июле главный фактор — широта, которая характеризует зональное распределение температур с ее ростом с севера на юг. В переходные сезоны, осенью

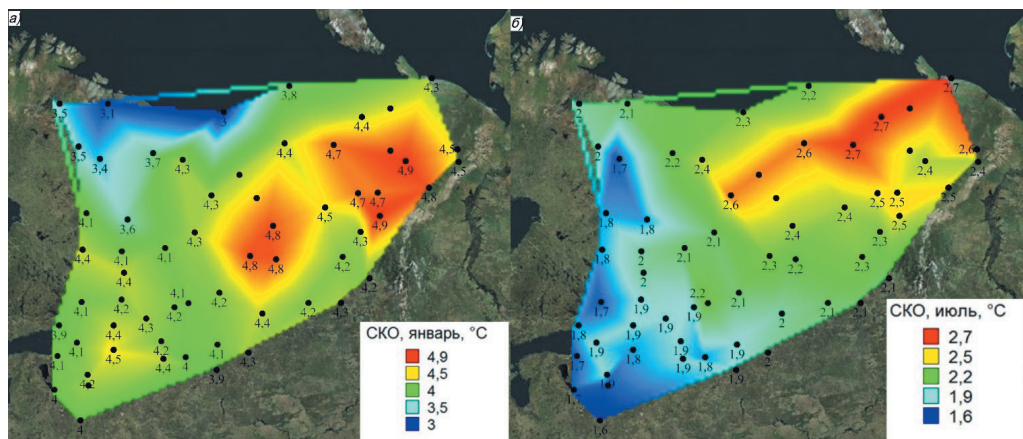


Рис. 4. Пространственное распределение среднего квадратического отклонения рядов температур января (а) и июля (б) за весь период наблюдений (°С).

Fig. 4. Spatial distribution of mean square deviation of January (a) and July (b) temperature series for the whole observation period (°C).

и весной, влияют обе эти координаты, хотя вклад широты в уравнение (2) в апреле составляет всего 5%, а в октябре в уравнение (4) — 22%.

Январь $T_1 = -0,324\lambda - 0,69$ $R = 0,91$ (1)

Апрель $T_4 = -0,271\phi - 0,282\lambda + 62,98$ $R = 0,94$ (2)

Июль $T_7 = -0,599\phi + 53,58$ $R = 0,87$ (3)

Октябрь $T_{10} = -0,360 \phi - 0,137\lambda + 30,0$ $R = 0,96$ (4)

Также были рассчитаны средние квадратические отклонения (СКО) за многолетний период и установлено, что во все сезоны года они увеличиваются с юго-запада на северо-восток (рис. 4). При этом зимой СКО почти в 2 раза больше, чем летом, что необходимо учитывать при оценке статистической значимости климатических изменений температур, то есть рассматривать эти изменения по отношению к естественной изменчивости (СКО).

Методика оценки климатических изменений средних значений

Основная задача данного исследования состоит в наиболее корректной оценке климатических изменений средних значений температур воздуха во времени. Была использована методика, основанная на сравнении остаточных дисперсий нестационарных моделей, которая была успешно применена в работах [12, 16—18].

Алгоритм реализации этой методики в данном исследовании состоит в следующем:

— временной ряд аппроксимируется моделью ступенчатых переходов от одного стационарного среднего к другому и определяется год такого перехода;

— если модель ступенчатых изменений эффективнее модели стационарного среднего, то изменения среднего значения в этом случае были рассчитаны как $\Delta T_{ст} = T_{ср2} - T_{ср1}$, где $T_{ср1}$, $T_{ср2}$ — средние значения до и после года резкого изменения среднего.

— для оценки статистической значимости различий двух средних значений проводится оценка стационарности средних по критерию Стьюдента.

— определяется вклад полученных климатических изменений среднего по отношению к естественной изменчивости, то есть СКО ($\Delta T/СКО$) и если $\Delta T/СКО$ превышает 1 или 2, то изменения статистически значимы, соответственно, с вероятностью $P = 68\%$ (одно-сигмовый доверительный интервал) и $P = 95\%$ (двух-сигмовый доверительный интервал) [17].

Результаты и их обсуждение

Если разделить временные ряды с началом в 1900 г. на две примерно равные части (1900—1960 гг. и 1961—2024 гг.), рассчитать для них средние и их разность ΔT , то получим рост средних значений по территории СЗФО в среднем от 0,5 °С на юго-западе до 1,5 °С на северо-востоке (рис. 5).

Аппроксимация временных рядов каждой половины ряда моделями тренда и ступенчатых изменений среднего показала, что для периода с 1900 г. по 1960 г. они являются неэффективными и для этого периода лучше всего подходит модель стационарного среднего. Для периода с 1961 г. по 2024 г. модели нестационарного

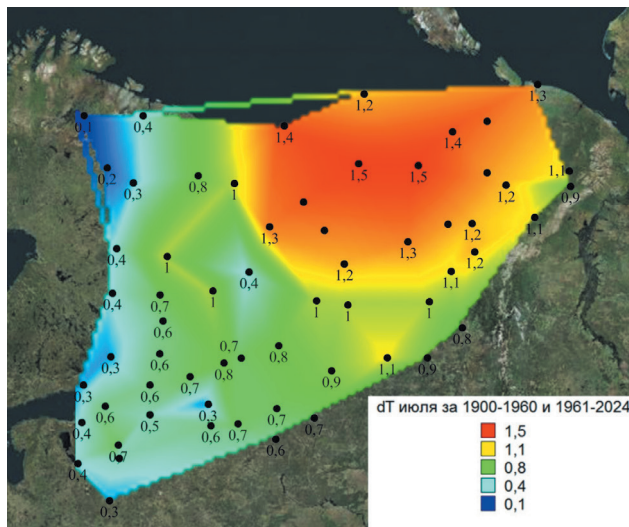


Рис. 5. Пространственное распределение разности средних температур июля за два периода 1900—1960 гг. и 1961—2024 гг. в °С.

Fig. 5. Spatial distribution of the difference in average July temperatures over two periods 1900—1960 and 1961—2024 in °С.

среднего являются эффективными и статистически значимыми, хотя не для всех пунктов наблюдений на территории СЗФО и по-разному в разные сезоны года, поэтому можно считать, что проявление современного потепления в рядах температуры воздуха имеет место в этот период и именно для него следует оценивать количественные изменения средних.

Было установлено, что для температур января эффективные модели ступенчатых изменений имеют место в 35 % случаев, для температур апреля и июля — в 65 %, для температур октября — в 40 % случаев.

Результаты количественной оценки роста температур рассматриваемых месяцев представлены на рис. 6.

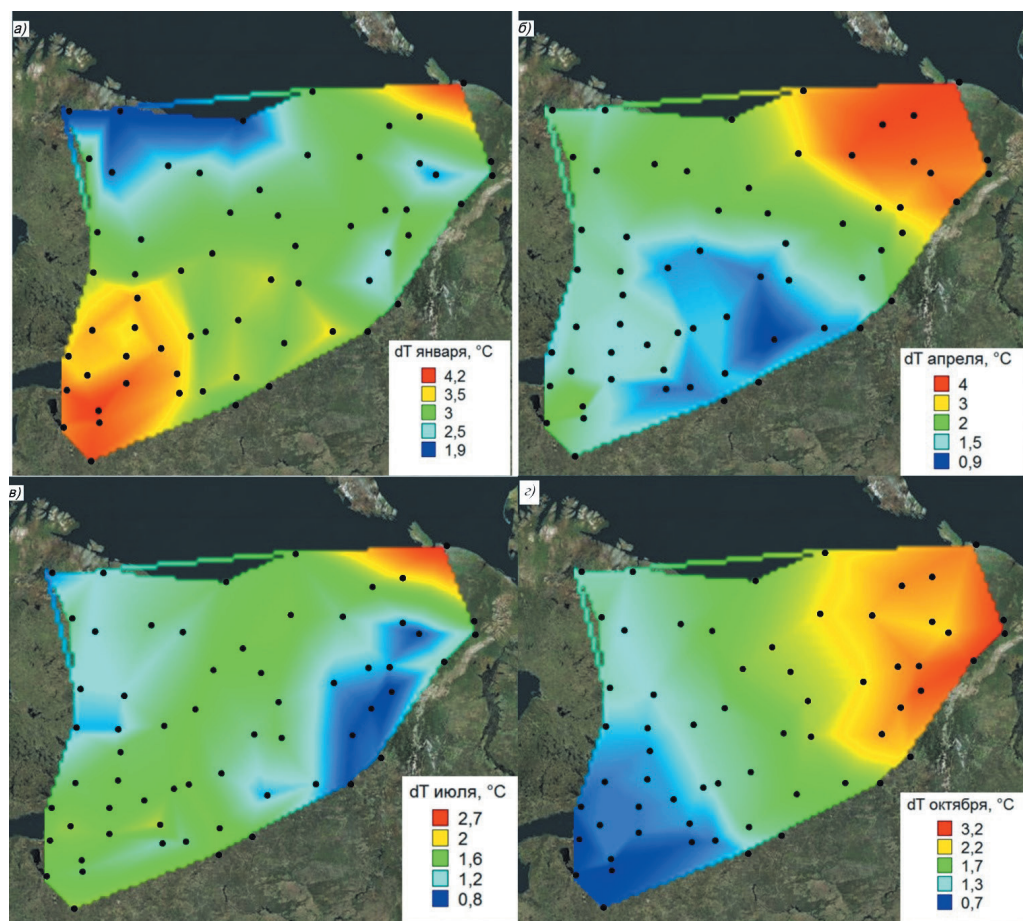


Рис. 6. Пространственные распределения значений ΔT в январе (а), апреле (б), июле (в), октябре (г) за период с 1961 г. по 2024 г., в °C.

Fig. 6. Spatial distribution of warming ΔT in January (a), April (b), July (c), October (d), 1961—2024, in °C.

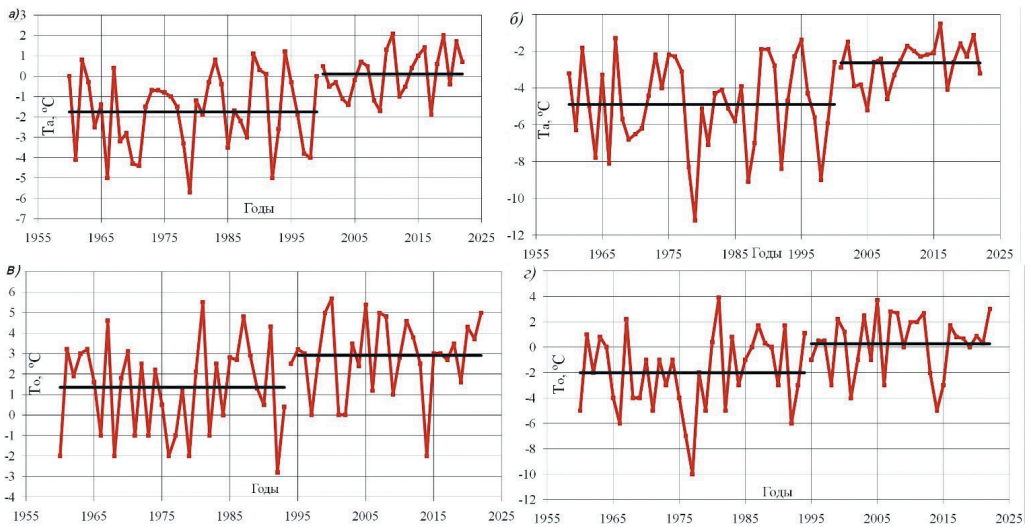


Рис. 7. Нестационарные ряды средних температур апреля (T_a) на станциях Кандалакша (а), Канин Нос (б) и октября (T_o) на станциях Архангельск (в) и Печора (г), разделенных по году ступенчатых изменений.

Fig. 7. Non-stationary time series of average April temperatures (T_a) at the stations Kandalaksha (a), Kanin Nos (b) and October temperatures (T_o) at the stations Arkhangelsk (c), Pechora (d), separated by the year of step changes.

Выполненная количественная оценка климатического повышения температур воздуха позволила установить, что в январе наименьшее потепление в $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается на Кольском полуострове, а наибольшее (до $4,3\text{ }^{\circ}\text{C}$) — на юго-западе региона в Новгородской и Псковской областях. Также имеют место локальные максимумы на северо-востоке на побережье Северного Ледовитого океана в $4,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (метеостанция Амдерма). В июле на всех метеостанциях наблюдается потепление от $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ на юго-востоке до $2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ на северо-востоке на станции Амдерма. В апреле наибольшее потепление имеет место на северо-востоке (до $4\text{ }^{\circ}\text{C}$), а наименьшее ($0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$) — на юге территории. В октябре наблюдается похожая картина с максимумом, равным $3,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, на востоке и минимумом ($0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$) — на юго-западе. По отношению к естественной изменчивости (СКО) потепление только немного его превышает в отдельных частях рассматриваемого региона, где имеют место наибольшие изменения, а в большинстве случаев пока меньше СКО.

Сравнение средних значений двух частей ряда, разделенных по году ступенчатого перехода, за период с 1961 г. по 2024 г. по критерию Стьюдента показало, что они практически во всех случаях статистически различаются при уровне значимости $\alpha = 5\%$, и на многих станциях и при уровне значимости $\alpha = 1\%$, поэтому можно считать, что год ступенчатого перехода действительно определен верно и разделяет два стационарных периода. В качестве примера на рис. 7 представлены хронологические графики рядов температур воздуха апреля и октября

со статистически значимым различием средних значений по критерию Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 1\%$.

Причины климатических изменений в СЗФО

По мнению экспертов МГЭИК [7], доминирующей причиной современного глобального потепления является антропогенная эмиссия в атмосферу углекислого газа. На наш взгляд, в региональных изменениях климата могут принимать участие другие факторы, в частности, процессы крупномасштабного взаимодействия в системе океан—атмосфера. Обоснованием этому служит полученный вывод о том, что изменения среднемесячной температуры в СЗФО больше соответствуют модели ступенчатых изменений среднего, чем линейного или монотонного тренда, который характерен для эмиссии парниковых газов. Такие же ступенчатые изменения были выявлены и в среднемесячном индексе Североатлантического колебания (САК), который резко вырос в конце 1980-х гг. в месяцы холодного периода года [18].

Предполагается, что имеет место определенное влияние САК на переходы температуры воздуха от одного стационарного режима к другому, поэтому в дальнейших исследованиях планируется более детальное рассмотрение этого вопроса.

Было построено пространственное распределение лет ступенчатых изменений температуры воздуха января, представленное на рис. 8 а, для предварительной оценки связи года ступенчатых изменений в зимней температуре воздуха с зимним индексом САК. Год начала современного январского потепления смещается с запада на северо-восток СЗФО с конца 1980-х гг. до начала 2000-х гг., что, возможно, связано с постепенным усилением влияния зонального переноса воздушных масс зимой на восточные части рассматриваемого региона и снижением влияния других центров действия атмосферы (Сибирский антициклон, Арктический антициклон).

На рис. 8 б—г приведены многолетние ряды среднемесячной температуры января (синие кривые), осредненные в каждом из трех выделенных по году ступенчатых изменений районов СЗФО: юго-западный, центральный, восточный с разными годами ступенчатых изменений (вертикальные линии) и разными средними значениями двух стационарных периодов (синие горизонтальные линии). На рис. 8 б приведен многолетний ряд январского индекса САК (красная кривая) также с выделенной вертикальной линией годом ступенчатых изменений (1988 г.) и двумя стационарными средними (красные горизонтальные линии). Из сопоставления хронологических графиков температур воздуха и индекса САК следует, что смещение во времени произошедшего изменения структуры временного ряда для западного района отсутствует, а для центрального составляет 5 лет (1990-е гг.). Коэффициенты корреляции между январским САК и температурой января средней в каждом из районов с учетом смещения во времени составляют $R = 0,66$ для юго-западного и $R = 0,58$ — для центрального района соответственно.

Для температур апреля и июля пространственные распределения лет начала современного потепления практически такие же, как и для января. В октябре же общая тенденция изменения с юго-запада на северо-восток сохраняется, но на юго-востоке имеет место начало потепления в 1980 г.

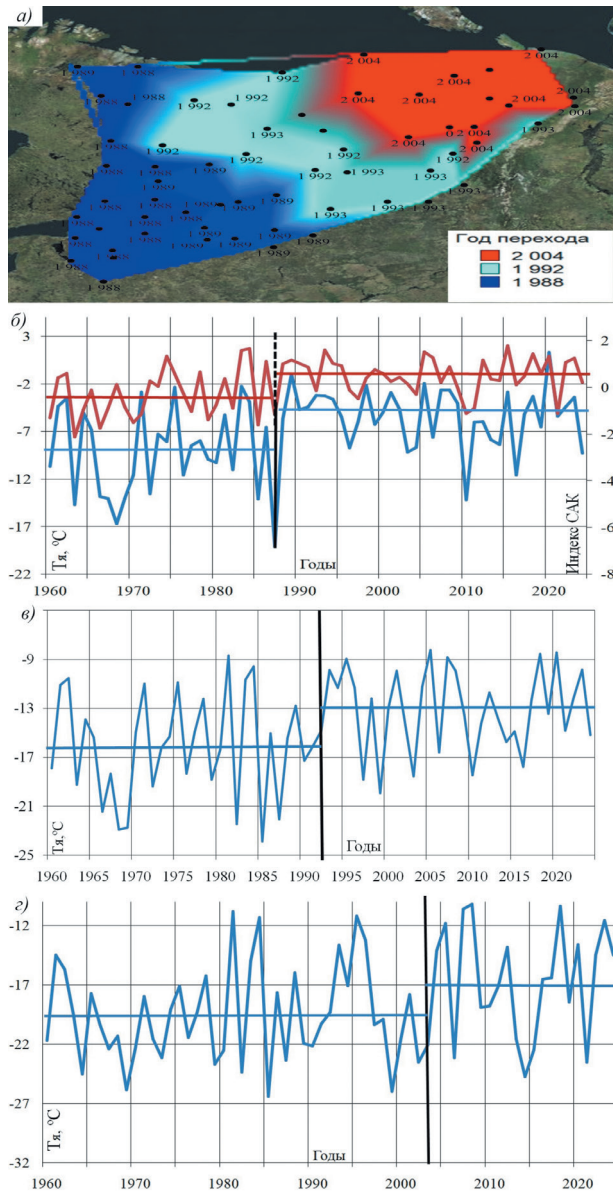


Рис. 8. Пространственное распределение лет начала современного январского потепления (а) и хронологические графики температуры января, осредненной по территории для юго-западной (б), центральной (в) и восточной (г) частей СЗФО и индекса САК (б).

Fig.8. Spatial distribution of the years of the beginning of modern January warming (a) and chronological graphs of January temperature averaged over the territory for the southwestern (b), central (c) and eastern (d) parts of the Northwestern Federal District and the NAO index.

Выводы

Выполненное исследование позволило уточнить как период, так и количественную оценку современного изменения средних значений температур воздуха в СЗФО, а также выявить одну из возможных региональных причин этих изменений. Были получены следующие основные результаты.

1. За счет дополнения информации из разных климатических архивов и проведенного сравнительного анализа данных архивов удалось увеличить число пунктов наблюдений на территории СЗФО с наиболее продолжительными рядами с 45 до 62 станций и дополнить информацией за последние годы вплоть до 2024 г. На основании методики восстановления пропусков и приведения рядов наблюдений к многолетнему периоду средняя продолжительность рядов была увеличена до 110—167 лет в зависимости от месяца года. После выполненной оценки качества и однородности рядов наблюдений сформирована база надежных данных для проведения дальнейших исследований.

2. На основе сформированных продолжительных рядов наблюдений получены уточненные оценки средних многолетних температур отдельных месяцев и средних квадратических отклонений (СКО), построены их пространственные распределения и эффективные региональные регрессионные зависимости, связывающие средние многолетние температуры с широтой и долготой для средних месяцев всех сезонов года.

3. При аппроксимации многолетних рядов среднемесячных температур воздуха моделями нестационарного среднего (ступенчатые изменения) установлено, что все современные изменения температуры воздуха на территории СЗФО относятся ко второй половине XX века, поэтому оценка влияния современного потепления осуществлена по наблюдениям за период с 1961 г. по 2024 г.

4. Оценка изменения средних температур воздуха за период с 1961 г. по 2024 г. осуществлялась на основе аппроксимации временных рядов моделями ступенчатых изменений среднего. Сравнение средних значений двух частей ряда, разделенных по году ступенчатого перехода, за выбранный период по критерию Стьюдента показало, что они практически во всех случаях статистически различаются при уровне значимости $\alpha = 5\%$, и на многих станциях и при уровне значимости $\alpha = 1\%$.

5. Установлено, что в январе наиболее значительное потепление (до $4,3\text{ }^{\circ}\text{C}$) имело место на юго-западе, наименьшие изменения наблюдались на северо-западе (до $2\text{ }^{\circ}\text{C}$) и в центральной части территории СЗФО потепление составило $2,5\text{—}3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. В июле на всех метеостанциях наблюдается потепление от $0,8$ на юго-востоке до $2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ на северо-востоке. В апреле наибольшее потепление имеет место на северо-востоке (до $4\text{ }^{\circ}\text{C}$), а наименьшее на юге ($0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$). В октябре наблюдается похожая картина с максимумом, равным $3,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, на востоке и минимумом ($0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$) — на юго-западе. По отношению к естественной изменчивости (СКО) потепление только немного его превышает в отдельных случаях наибольших изменений, а в большинстве случаев — пока меньше СКО.

6. Исследование пространственного распределения лет ступенчатых переходов от одного стационарного режима к другому позволило установить, что

этот год смещается с юго-запада с конца 1980-х гг. на северо-восток до начала 2000-х гг. Выдвинуто предварительное предположение, что сам год перехода и его пространственное смещение могут быть связаны с усилением влияния западного переноса, снижением влияния других центров действия атмосферы и постепенным смещением арктического антициклона к полюсу. Имеют место тесные зависимости между январским индексом САК и январской температурой воздуха с коэффициентами корреляции $R = 0,66$ для юго-западной части и $R = 0,58$ для центральной при сдвиге в 5 лет.

Список литературы

1. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. М., Росгидромет, 2023. 108 с. ISBN 978–5–906099–58–7.
2. Малинин В. Н., Вайновский П. А. О причинах первого потепления Арктики в XX столетии // Ученые зап. РГГМУ. 2018. № 53. С. 34—55.
3. Гудкович З. М., Карклин В. П., Смоляницкий В. М., Фролов И. Е. О характере и причинах изменений климата Земли // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 1(81). С. 15—23.
4. Алексеев Г. В. Потепление климата Арктики: расхождения между глобальными моделями климата и наблюдениями и возможные причины // Гидрометеорология и экология. 2023. № 71. С. 207—230. doi: 10.33933/2713-3001-2023-71-207-230.
5. Тимохов Л. А., Малинин В. Н., Иванов В. В. Связь долговременных изменений температуры воздуха в Арктике с колебаниями гидрометеорологических и астрогоефизических факторов // Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 451—473. doi: 10.33933/2713-3001-2024-76-451-473.
6. Шерстюков Б. Г. Глобальное потепление и его возможные причины // Гидрометеорология и экология. 2023. № 70. С. 7—37. doi: 10.33933/2713-3001-2023-70-7-37.
7. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
8. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Под ред. В. М. Катцова; Росгидромет. Санкт-Петербург: Научное издание, 2022. 676 с.
9. Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации Общее резюме; Росгидромет. Санкт-Петербург: Научное издание, 2014. 60 с.
10. Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2012. 194 с.
11. Дроздов В. В. К вопросу учета долговременных климатических изменений в опорных зонах социально-экономического развития российской Арктики для совершенствования судоходства и промышленного потенциала // Арктика: экология и экономика. 2019. № 2 (34). С. 64—79. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-2-64-79.
12. Лобанов В. А., Абанников В. Н., Окуличева А. А., Григорьева А. А. Современные и будущие изменения климата Ленинградской области и их влияние на агроклиматические характеристики. Метеорология и гидрология, 2023, №9. С. 100—113. DOI: 10.52002/0130-2906-2023-9-100-113.
13. Малинин В. Н., Гурьянов Д. А. Межгодовая изменчивость климатических сезонов в Санкт-Петербурге. Известия Русского географического общества. 2015. 147(5). С.17—27.
14. Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб., Изд. РГГМУ, 2008. 408 с.
15. Лобанов В. А., Лемешко Н. А., Жильцова Е. Л. и др. Восстановление многолетних рядов температуры воздуха на Европейской территории России. // Метеорология и гидрология. 2005. № 2. С. 5—14.
16. Мама Магбини Токпа, Лобанов В.А. Современные климатические изменения температуры воздуха в Центральной Африке // Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 722—745.

17. Шукри О. А. А., Лобанов В. А., Хамид М. С. Современный и будущий климат Аравийского полуострова. Монография. СПб.: РГГМУ, 2018. 190 с.
18. Тошакова Г. Г. Особенности и причины современных климатических изменений в России // Географический вестник. Пермский университет. 2016. № 3(38). С. 79—89.

References

1. *Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2022 god = Report on climate features in the Russian Federation for 2022*, Moscow: Roshydromet, 2023: 108 p. ISBN 978-5-906099-58-7. (In Russ.).
2. Malinin V. N., Vainovsky P. A. On the reasons for the first warming of Arktiki in the twentieth century. *Uchenyye zapiski RGGMU = Scientific papers of RSHU*. 2018;(53):(34—55). (In Russ.).
3. Gudkovich Z. M., Karklin V. P., Smolyanitsky V. M., Frolov I. E. On the nature and causes of changes in the Earth's climate // *Problemy Arktiki i Antarktiki = Problems of the Arctic and Antarctic*. 2009;1(81):(15—23). (In Russ.).
4. Alekseev G. V. Arctic climate warming: discrepancies between global climate models and observations and possible causes. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(71):(207—230). (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-71-207-230.
5. Timokhov L. A., Malinin V. N., Ivanov V. V. The relationship of long-term changes in air temperature in the Arctic with fluctuations in hydrometeorological and astrogeophysical factors. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(76):451—473. (In Russ.). doi:10.33933/2713-3001-2024-76-451-473.
6. Sherstyukov B. G. Global warming and its possible causes. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(70):(7—37). (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-70-7-37.
7. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.:1535.
8. *Tretiy otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. = Third estimation report on climate changes and their consequences on the territory of Russian Federation*. St. Petersburg: Roshydromet. Naukoemkie tehnologii, 2022: 676 p. (In Russ.).
9. *Vtoroy otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii.Obshee rezhyume = Second estimation report on climate changes and their consequences on the territory of Russian Federation*. General summary. St. Petersburg: Naukoemkie tehnologii, 2014: 60 p. (In Russ.).
10. Gruza G. V., Rankova E. YA. Nablyudaemie i ojidaemie izmeneniya klimata Rossii: temperatura vozdukha = Observed and expected climate changes in Russia: air temperature. Obninsk: VNIIGMI, 2012: 194 p. (In Russ.).
11. Drozdov V. V. On the issue of taking into account long-term climatic changes in the key zones of socio-economic development of the Russian Arctic to improve shipping and industrial potential// *Arktika: ecologia i ekonomika= Arctic: Ecology and Economics*. 2023;2(34):(64—79). (In Russ.). DOI: 10.25283/2223-4594-2019-2-64-79.
12. Lobanov V. A., Abannikov V. N., Okulicheva A. A., Grigor'eva A. A. Current and future climate changes in Leningrad Oblast and their impact on agroclimatic characteristics. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2023;(9):(100—113). (In Russ.). DOI: 10.52002/0130-2906-2023-9-100-113.
13. Malinin V. N., Gurjanov D. A. The interannual variability of climatic seasons in St. Petersburg. *Izvestiya Russkogo Geograficheskogo obsh'estva = Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2015;147(5):(17—27). (In Russ.).
14. Malinin V.N. *Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoy informacii = Statistical methods for the analysis of hydrometeorological information*. SPb.: RSHU, 2008: 408 p. (In Russ.).
15. Lobanov V. A., Lemesheko N. A., Zhiltsova E. L., Gorlova S. A., Reneva S. A. Reconstruction of longterm series of air temperature in the European territory of Russia. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2005;(2):(5—14). (In Russ.).

16. Mami M. Tokpa, Lobanov V. A. Current climatic changes in air temperature in Central Africa // *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2022:(69):(722—745). (In Russ.).
17. Shukri O. A. A., Lobanov V. A., Khamid M. S. *Sovremennyi i budushiy klimat Araviyskogo poluostrova. Monografiya = The current and future climate of the Arabian Peninsula*. Monograph. St. Petersburg: RSHU, 2018: 190 p. (In Russ.).
18. Toshchakova G. G. Features and causes of modern climate change in Russia. *Geograficheskii vestnik. Permskii universitet = Geographic Bulletin. Perm University*. 2016:3(38):(79—89). (In Russ.).

Информация об авторах

Груздев Алексей Игоревич, аспирант кафедры метеорологии, климатологии и охраны атмосферы, Российский государственный гидрометеорологический университет, gruzdev2542022@mail.ru.

Лобанов Владимир Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры метеорологии, климатологии и охраны атмосферы, Российский государственный гидрометеорологический университет, valobanov56@mail.ru.

Information about authors

Gruzdev Alexey I., post-graduate student of the Department of Meteorology, Climatology and Atmospheric Protection, Russian State Hydrometeorological University.

Lobanov Vladimir A., Dr. of Sci. (Tech.), Professor of the Department of Meteorology, Climatology and Air Protection, Russian State Hydrometeorological University.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 03.02.2025

Принята к печати после доработки 05.05.2025

The article was received on 03.02.2025

The article was accepted after revision on 05.05.2025