



Научная статья

УДК 551.583

<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.3.5>

ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУР НА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ С 1500 ПО 2004 ГГ. И АНАЛИЗ ИХ АНОМАЛИЙ В СОВРЕМЕННЫЙ ПЕРИОД

Борис Азреталиевич Ашабоков^{1,2},
Алла Амарбиевна Ташилова^{3*},
Лара Асировна Кешева⁴,
Наталья Вячеславовна Теунова⁵

^{1,3,4,5} Высокогорный геофизический институт (д. 2, пр. Ленина, Нальчик, 360030, Российская Федерация)

² Институт информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН

^{1,2} ashabokov.boris@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2889-0864>

³ tashilovaa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2368-6047>

⁴ kesheva.lara@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5132-1563>

⁵ nata0770@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1135-3587>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

Объектом исследования является изменение сезонных и годовых температур на европейской территории с 1500 по 2004 гг., полученных из открытых источников с использованием прокси-данных (1500–1900 гг.) и инструментальных данных (1900–2004 гг.), а также климатические изменения на территории Северного полушария и на юге европейской территории России (ЕТР) с 1961 по 2024 гг. по данным инструментальных измерений.

Для моделей годовых и сезонных температур на европейской территории, построенных методом синусоидальной регрессии, определены периодичности, моделирующие процесс на статистически значимом уровне. Регрессионный анализ показывает, что все тренды положительные и, несмотря на небольшие значения R^2 , значимые на 5 %-м уровне. В ряду годовых температур на европейской территории холодные экстремумы имеют место до XX столетия, а все теплые экстремумы – в XX и в начале XXI вв. В результате спектрального анализа получено, что для ряда среднегодовой температуры на европейской территории с 1500 по 2004 гг. выделены основные периоды: 30-летний и 3–4-летняя квазипериодичность. Используя вейвлет-преобразование, определены периодичности рядов в разных временных масштабах, что демонстрирует тот факт, что статистически значимые масштабы периодичностей во временном ряде 1500–2004 гг. не только присутствуют, но и эволюционируют.

Линейный тренд годовых температур Северного полушария и юга ЕТР в современный период (1961–2024 гг.)

демонстрирует устойчивый рост со скоростью $0,24\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет и $0,28\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет. В современный период как для Северного полушария, так и для юга ЕТР определяющими являются внутривековые периодичности годовых температур (2–3–4-летние). Из модели синусоидальной регрессии следует, что периодичность в 3 года, формирующая ряд, определяется как основная уже при использовании первых трех гармоник в модели. В формировании температурного режима добавляются 9–10-летние периоды, определяемые, вероятно, известной цикличностью солнечной активности.

Ключевые слова: временной ряд температуры, аномалии, экстремумы, периоды, спектральный анализ, вейвлет-преобразование

Для цитирования: Ашабоков Б.А., Ташилова А.А., Кешева Л.А., Теунова Н.В. Динамика европейских температур с 1500 по 2004 гг. и анализ их аномалий в современный период // Наука. Инновации. Технологии. 2025. №3. С. 123-148. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.3.5>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 20.06.2025;
одобрена после рецензирования 29.08.2022;
принята к публикации 16.09.2025.

**1.6.18. Atmospheric and Climate Sciences
(Physical and Mathematical Sciences)**
Research article

**Dynamics of European temperatures from 1500
to 2004 and analysis of their anomalies
in the modern period**

**Boris A. Ashabokov^{1,2},
Alla A. Tashilova^{3*},
Lara A. Kesheva⁴,
Nataliya V. Teunova⁵**

^{1,3,4,5} High-Mountain Geophysical Institute (2, Lenin av., Nalchik, 360030, Russian Federation)

² Institute of Informatics and Regional Management Problems of the KBSC RAS

^{1,2} ashabokov.boris@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2889-0864>

³ tashilovaa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2368-6047>

⁴ kesheva.lara@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5132-1563>

⁵ nata0770@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1135-3587>

* Corresponding author

Abstract.

The object of the study is the change in seasonal and annual temperatures in the European territory from 1500 to 2004, obtained from open sources using proxy data (1500–1900) and instrumental data (1900–2004), as well as climate changes in the Northern Hemisphere and in the south of European Russia from 1961 to 2024 according to instrumental measurements. For the models of annual and seasonal European temperatures built by the sinusoidal regression method, periodicities were determined that simulate the process at a statistically significant level. Regression analysis showed that all trends are positive and, despite small R^2 values, significant at the 5 % level. In a series of European annual temperatures, cold extremes occurred before the 20th century, and all warm extremes in the 20th and early 21st centuries. As a result of spectral analysis, it was found that for the European average annual temperature series from 1500 to 2004, the main periods were identified: 30-year and 3–4-year quasi-periodicity. Using the wavelet transform, the periodicities of the series were determined on different time scales, which demonstrated the fact that statistically significant periodicity scales in the time series of 1500–2004 are not only present but they evolve. The linear trend of annual temperatures in the Northern Hemisphere and the south of the European Russia in the modern period (1961–2024) demonstrates a steady increase at a rate of 0.24 °C/10 years and 0.28 °C/10 years. In the modern period, both for the Northern Hemisphere and for the south of the European Russia, intra-decadal periodicities of annual temperatures (2–3–4 years) are decisive. From the sinusoidal regression model, it follows that the 3-year periodicity that forms the series is defined as the main one already when using the first three harmonics in the model. In the formation of the temperature regime, 9–10-year periods are added, determined, probably, by the known cyclicity of solar activity.

Keywords: European temperatures, anomalies, extremes, periods, spectral analysis, wavelet transform

For citation: Ashabokov BA, Tashilova AA, Kesheva LA, Teunova NV. Dynamics of European temperatures from 1500 to 2004 and analysis of their anomalies in the modern period. *Science. Innovations. Technologies.* 2025;(3):123-148. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.3.5>

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 20.06.2025;
approved after reviewing 29.08.2022;
accepted for publication 16.09.2025.

Введение

В последнее время крайне актуальным стал вопрос об изменениях климата как на протяжении длительных исторических периодов (сотни лет), так и за последние десятилетия. Знание климата за прошлые столетия помогает улучшить понимание естественной изменчивости климата, а также решить вопрос о том, является ли современное изменение климата беспрецедентным в долгосрочном контексте [1]. Поскольку до середины XIX века отсутствовали инструментальные измерения температуры, то использование косвенных данных (прокси-данных) для восстановления температуры и осадков прошлых столетий сформировало новую методику исследования климата. А именно, использование архивов естественного климата или, как уже упоминалось выше, прокси-данных, таких как годовые кольца деревьев, кораллы и ледяные керны, а также исторических документальных записей для реконструкции климата в прошлом как в глобальном, так и региональном масштабах [2, 3]. Например, по результатам исследования климата за несколько столетий в работе [2] сделан вывод, что потепление в Северном полушарии за последнее десятилетие, вероятно, аномально в контексте не только последних 1000 лет, но и более длительного периода. Этот вывод можно распространить по крайней мере на последние 1700 лет, если использовать данные годовых колец, но с учетом дополнительных серьезных оговорок.

Изменение климата сопровождалось сменой теплых и холодных периодов. Наступление холодного периода (снижение температуры на 2 градуса) началось с IV века нашей эры и продолжалось до VII века, после чего с X по XIII век наблюдался средневековый оптимум, когда температура на планете поднялась более чем на 1 градус. Однако с XIV по XIX век на планете вновь похолодало, наступил малый ледниковый период. И, наконец, современное потепление может быть очередным этапом в долгой истории климатических изменений, которые успешно пережило человечество [4].

Многие климатологи считают, что наблюдаемое глобальное повышение температуры является результатом совместного воздействия на климатическую систему не только антропогенных, но и естественных факторов [5]. В докладах Росгидромета [6] отмечается,

что рост среднегодовой температуры в России с середины 70-х годов XX века в два с половиной раза превосходит глобальный. Начиная с 80-х годов каждое десятилетие было теплее предыдущего, а если проанализировать 10 самых теплых лет за всю историю наблюдений, то 9 из них случились не в XX веке, а уже в XXI. За последнее десятилетие в среднем по планете потеплело на 0,17-0,18 °С, а в России – на 0,48 °С. Если же взять северные территории, то там температура поднялась на 1,2 °С.

Такой значительный рост средней температуры характерен для стран, лежащих в высоких широтах, и обусловлен так называемой арктической амплификацией (полярное усиление). В работе [7] отмечается, что полярное усиление – это явление, при котором любое изменение чистого радиационного баланса (например, усиление парникового эффекта) приводит к большему изменению температуры вблизи полюсов, чем в среднем по планете. Основными механизмами, определяющими арктическое усиление, являются различные климатические обратные связи, работающие по-разному в разных широтах, и перенос тепла к полюсу, вызванный атмосферной и океанической циркуляцией. Доиндустриальные исследования показали, что естественные физические механизмы являются ключевыми факторами, определяющими полярное усиление. Однако в нынешних климатических условиях возрастающие антропогенные воздействия суммируются с естественными и должны быть адекватно учтены.

В Ежегодном обзоре глобального климата Всемирной метеорологической организации [8] подтверждается, что 2024 год стал первым календарным годом, когда температура воздуха была более чем на 1,5 °С выше, чем в доиндустриальную эпоху, а средняя глобальная приземная температура – на $(1,55 \pm 0,13)$ °С выше средней температуры 1850–1900 годов. Это был самый теплый год за 175 лет наблюдений.

Климат на юге европейской территории России (ЕТР) отличается большой неоднородностью, но в последнее время выявляется общая тенденция: на большей части территории увеличилась засушливость. Ранее авторами были оценены скорость и масштабы как медленных изменений климата, так и его экстремальных про-

явлений на юге ЕТР в последние десятилетия [9, 10]. В работе [9] сделан вывод, что во всех климатических зонах юга России, за исключением высокогорной (по данным м/станции Терскол, 2144 м н.у.м), за последние десятилетия наблюдается статистически значимое увеличение средних годовых температур. В динамике средних сезонных температур во всех климатических зонах юга ЕТР наблюдается общая закономерность – наибольшая скорость роста имеет место в летний сезон, в том числе в высокогорной зоне, $0,32\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет (вклад тренда в объясненную дисперсию $D = 35,6\%$). Результаты исследований в [10] показывают, что в распределении экстремальных значений температуры на юге ЕТР имеются две взаимно обратные тенденции – нелинейный рост горячих экстремумов температуры, превышающих верхний порог, и снижение холодных экстремумов, определяемых ниже порогового значения.

Материалы и методы исследований

В работе [2] отмечается, что большинство попыток реконструировать температуры используют варианты методологии «реконструкция плюс инструментальное измерение», в которой прокси-данные (годовые кольца деревьев, ледяные керны или кораллы), считающиеся чувствительными к прошлым колебаниям температуры поверхности земли, стандартизируются и центрируются, а затем объединяются для формирования ряда. Затем полученный ряд масштабируется по отношению к целевому инструментальному ряду (например, ряду среднегодовой температуры Северного полушария) для получения реконструкции полушария или глобальной средней температуры.

В данном исследовании для анализа климата на европейской территории был использован временной ряд температур за 1500–2004 гг., включающий в себя как реконструкцию (1500–1900 гг.), так и инструментальные данные (1900–2004 гг.) Реконструированные годовые и сезонные температуры европейской территории получены из [11]. Инструментальные данные за 1901–2002 гг. взяты из работы [12], данные за 2003–2004 гг. – из работы [13].

Для фокусировки современных климатических изменений из длинного ряда температур Северного полушария [14] был вы-

делен современный период с 1961 по 2024 гг., кроме того, проведен анализ среднегодовых температур на юге европейской территории России (ЕТР) по данным инструментальных измерений за этот же период (данные предоставлены Северокавказским управлением гидрометеослужбы). Исследование изменений температурного режима указанных временных рядов было проведено методами статистического и регрессионного анализа, спектрального анализа и вейвлет-преобразования с помощью статистических пакетов SPSS, STATISTICA и программы Past 4.15 (<https://www.nhm.uio.no/english/research/resources/past>) [15, 16, 17].

Результаты исследований и их обсуждение

Остановимся на анализе европейских годовых и сезонных температур за 1500–2004 гг. На рисунке 1а–д представлены исходные графики сезонных и годовых температур с 1500 по 2004 гг. (синяя линия). Используя метод синусоидальной регрессии [17], были построены модели соответствующих сезонных и годовых рядов температур (рис. 1, а–д, красные линии). На графике годовых температур (рис. 1, д) для модели синусоидальной регрессии определены периодичности (годы), моделирующие процесс и подгоняющие модель под исходные данные годовых температур на статистически значимом уровне ($R^2 = 0,286$, $p < 0,05$).

Средние европейские зимние температуры (рис. 1, а) в период с 1500 по 1900 год были ниже примерно на $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ для среднегодовых температур) по сравнению с XX веком, имеются 2 холодных экстремума. Для рассматриваемого периода в ряду зимних температур отсутствуют теплые экстремумы. Самая холодная европейская зима была в 1708/1709 гг.

Из графиков (рис. 1, б, в) видно, что весенняя и осенняя температура испытали систематическое столетнее похолодание по сравнению с нынешними условиями. Самые холодные весны наблюдались во время минимума Маундера (1645–1715 гг.). Амплитуда колебаний весенней температуры ($t_{max} - t_{min} = 4,19\text{ }^{\circ}\text{C}$) в мультидекадных масштабах превышает амплитуду осенних ($t_{max} - t_{min} = 3,02\text{ }^{\circ}\text{C}$). Из графика видно, что десятилетие 1995–2004 гг. было самым теплым за последние 500 лет, при этом, как известно по данным инс-

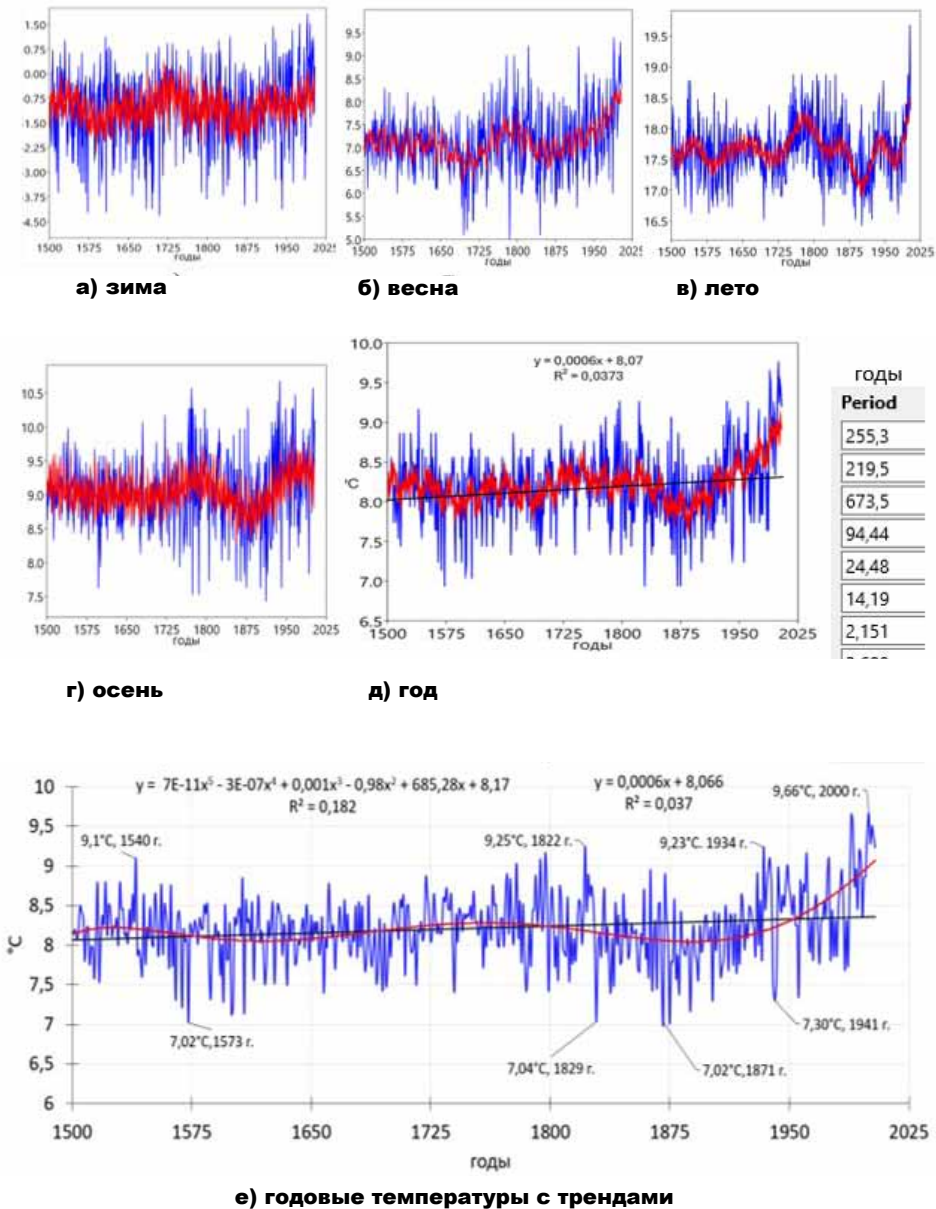


Рис. 1.

Исходный ряд годовых и сезонных европейских температур (а-е, синий) с моделью синусоидальной регрессии с 8 гармониками (а-д, красный), с полиномиальным и линейным трендами (е, красный и черный), 1500–2004 гг.

Fig. 1. Original series of annual and seasonal European temperatures (a–e, blue) with an 8-harmonic sinusoidal regression model (a–d, red), with polynomial and linear trends (e, red and black), 1500–2004

Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors

трументальных измерений, представленных в бюллетене Всемирной метеорологической организации (ВМО) [8], температура продолжала расти и каждое последующее десятилетие становилось теплее предыдущего. Аномально теплые весны и осени в целом стали более экстремальными в XX веке, особенно в последние десятилетия (таблица 1).

График летних температур не демонстрирует систематического похолодания в масштабе столетия относительно современных условий. 2003 год был самым жарким летом для данного ряда, но по последним данным ВМО [8] самое жаркое лето пришлось на 2024 г.

Из графика годовых температур (рис. 1, *e*) видно, что самые низкие годовые температуры ($7,02\text{ }^{\circ}\text{C}$) имели место в 1573 г., 1826 г., 1871 г., при этом можно заметить, что они не попадают ни в минимум Маундера (1645–1715 гг.), ни в «год без лета» после извержения вулкана Тамбора в 1815 г. В 20 веке минимальная температура была зафиксирована в 1941 году. Из четырех пиков теплых лет выделяется 2000 г. с температурой $9,66\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Статистический анализ сезонных и годовых температур на европейской территории 1500–2004 гг.

Из статистического анализа сезонных и годовых средних температур за 1500–2004 гг., результаты которого представлены в таблице 1, видно, что все сезонные значения средних температур положительные, за исключением зимнего сезона. Стандартное отклонение наибольшее в зимний сезон. Наибольший размах между максимальным и минимальным имело место также в зимний сезон ($5,89\text{ }^{\circ}\text{C}$), затем в весенний, летний и осенний со значениями $4,19\text{ }^{\circ}\text{C}$, $3,14\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $3,02\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно. Тест Колмогорова – Смирнова показал, что только зимний сезон имеет нормальную кривую распределения ($0,057 > 0,05$), остальные сезоны близки к нормальному распределению, но имеют незначительную правостороннюю асимметрию и положительный эксцесс, что характеризует распределение с большим количеством метеопараметров вблизи среднего значения, а также с большим количеством параметров, превышающих среднее значение.

Таблица 1. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЯДА ГОДОВЫХ ТЕМПЕРАТУР
НА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ, 1500–2004 ГГ.
Table 1. Statistical analysis of European annual temperature series, 1500–2004

Статистики	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
1. Среднее (ст. ошибка), \bar{x} (°C)	-1,04 (0,05)	7,12(0,03)	17,64 (0,02)	9,05 (0,02)	8,21 (0,02)
2. Стандартное отклон., σ (°C)	1,11	0,65	0,46	0,52	0,43
3. Минимум, min, (°C)	-4,15	5,08	16,48	7,53	7,01
4. Максимум, max (°C)	1,73	9,26	19,6	10,55	9,66
5. Размах, R (°C)	5,89	4,19	3,14	3,02	2,65
6. Асимметрия, As	-0,415	0,242	0,379	-0,032	0,093
7. Эксцесс, E	-0,12	0,718	0,436	0,398	0,65
8. Нормальность распред., $P > 0,05$	0,057 > 0,05 норм.	0,043 < 0,05 не норм.	0,046 < 0,05 не норм.	0,039 < 0,05 не норм.	0,042 < 0,05 не норм.
9. Экстремумы	Холодные экстремумы (ниже порогового значения)				
	2 экстр. ≤ -4,1°C	6 экстр. ≤ 5,4°C	1 экстр. ≤ 16,5°C	7 экстр. ≤ 7,7°C	7 экстр. ≤ 7,2°C
	1608 г. (-4,14) 1709г. (-4,15)	1695 г. (5,16) 1701 г. (5,34) 1713 г. (5,38) 1714 г. (5,44) 1785 г. (5,08) 1845 г. (5,21)	1902 г. (16,48)	1597 г. (7,65) 1774 г. (7,60) 1786 г. (7,63) 1875 г. (7,67) 1902 г. (7,72) 1912 г. (7,53) 1941 г. (7,72)	1573 г. (7,02) 1600 г. (7,13) 1601 г. (7,2) 1608 г. (7,13) 1889 г. (7,04) 1871 г. (7,02) 1875 г. (7,01) 1888 г. (7,16)
	Теплые экстремумы (выше порогового значения)				
		9 экстр. ≥ 8,8	8 экстр. ≥ 18,8	4 экстр. ≥ 10,4	7 экстр. ≥ 9,3
		1779 г. (8,88) 1794 г. (8,90) 1822 г. (9,06) *1920 г. (9,14) 1921 г. (8,76) 1989 г. (9,26) 1990 г. (8,97) 2000 г. (8,95) 2002 г. (9,21)	1757 г. (18,85) 1775 г. (18,80) 1807 г. (18,79) 1826 г. (18,76) 1999 г. (18,83) 2002 г. (18,91) 2003 г. (19,62)	1772 г. (10,54) 1938 г. (10,55) 1967 г. (10,44) 2000 г. (10,48)	1989 г. (9,64) 1990 г. (9,54) 1999 г. (9,44) 2000 г. (9,66) 2001 г. (9,30) 2002 г. (9,51) 2003 г. (9,37)

Источник: составлено авторами / Source: compiled by the authors.

* экстремумы в XX–XI вв. выделены полужирным.

Со второй половины XX века не было ни одного сезонного экстремума меньше нижнего порога, а именно: последние холодные экстремумы были определены в летний сезон 1902 г. ($16,48^{\circ}\text{C} < 16,5^{\circ}\text{C}$), и в осенние сезоны 1902 г. ($7,72^{\circ}\text{C}$), 1912 г. ($7,53^{\circ}\text{C}$), 1941 г. ($7,72^{\circ}\text{C}$) $< 7,7^{\circ}\text{C}$. Теплых экстремумов ($\geq 18,8^{\circ}\text{C}$) в летний сезон было определено 7 значений (из них три в 21 в.). По количеству экстремумов выделяется ряд средней весенней температуры ($n=15$), из которых 6 экстремумов меньше нижнего порога ($\leq 5,4^{\circ}\text{C}$, все экстремумы с XVII по XIX вв.) и 9 экстремумов превышают верхний порог ($\geq 8,8^{\circ}\text{C}$, из них 3 экстремума в XVIII–XIX вв., 6 экстремумов в XX–XXI вв.). В осенний сезон средние температуры имели 7 экстремальных значений ниже порогового ($\leq 7,7^{\circ}\text{C}$) и 4 экстремума выше порогового ($\geq 10,4^{\circ}\text{C}$). Выделяется зимний сезон, в котором наблюдается лишь 2 экстремальных значения ниже порогового $t=-4,1^{\circ}\text{C}$. В ряду годовых средних температур наблюдалось одинаковое количество экстремальных значений как выше, так и ниже пороговых, при этом все холодные экстремумы были определены до 20 столетия, а все теплые экстремумы – в XX и в начале XXI века.

Коротко остановимся на тенденции изменения среднегодовых температур на европейской территории. На рисунке 1, *e* изображен исходный ряд годовых температур с линейным и полиномиальными трендами. Полином демонстрирует периоды смены роста и снижения температуры, максимальное из которых пришлось на период с начала XIX века и до второй половины XX века, сменившийся устойчивым ростом температуры с 70-х годов XX века. Как видно из рисунка 1, *e*, главной закономерностью межгодовой изменчивости ряда температур является четко выраженное сложное циклическое колебание (тенденция), которое описано полиномом высокой ($m=5$) степени. Одновременно с этим мы видим однонаправленный постепенный рост температуры воздуха (тренд), который легко представить в виде полинома первой степени, то есть частный случай тенденции.

Регрессионный анализ показал, что все тренды положительные и, несмотря на небольшие значения R^2 , статистически значимые на 5 %-м уровне: скорость роста годовых температур составила $0,06^{\circ}\text{C}/100$ лет ($R^2 = 3,7\%$), зимних температур $0,09^{\circ}\text{C}/100$ лет

($R^2 = 1,4\%$), весенних температур $0,087\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ лет}$ ($R^2 = 3,8\%$), летних температур $0,03\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ лет}$ ($R^2 = 1,0\%$), осенних температур $0,04\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ лет}$ ($R^2 = 1,2\%$).

Спектральный анализ

Полагая, что ряд температур не является чисто случайным, в нем имеются некоторые, обычно не очень видные сразу (скрытые) закономерности, то с помощью периодограммы возможно более конкретно выделить регулярные компоненты колебательного типа. Если временной ряд имеет спектральное разложение вида:

$$X(t) = MX + a_n \cos \omega_n \tau + b_n \sin \omega_n \tau,$$

то периодограмма состоит из точек $(\omega_n, a_n^2 + b_n^2)$. Величина $(a_n^2 + b_n^2)$ – квадрат модуля характеризует мощность соответствующей гармоники.

Методом быстрого преобразования Фурье (БПФ) [16] был проведен спектральный анализ среднегодовой температуры на европейской территории, построена периодограмма (рис. 2), определены основные гармонические компоненты. С помощью БПФ было получено представление данных в частотной области и во временной. Из рисунка 2 видно, что несколько больших пиков в области некоторых частот указывают на то, что в спектральном разложении автокорреляционной функции присутствуют соответствующие гармонические компоненты, а именно: 250-летние, 504-летние, 167-летние, 30-летние и 3–4-летние циклы. Частоты и периоды, соответствующие пяти максимальным пикам периодограммы с наибольшими мощностями, представлены в таблице 2.

Из рисунка 2 видно, что функция монотонно возрастает при переходе точки с периодом $T = 167$ лет, поэтому этот период не учитывается. Далее рассматривая 504-летний диапазон, мы не можем говорить о наличии в нем циклов, период которых больше или равен половине длины ряда (следствие теоремы Котельникова), поэтому этот период также исключается. Таким образом, для ряда европейской среднегодовой температуры за период с 1500 по 2004 гг. можно выделить 30-летний период и 3-4-летнюю квазипериодичность.

Таблица 2. ПЯТЬ МАКСИМАЛЬНЫХ ПИКОВ ПЕРИОДОГРАММЫ РЯДА ГОДОВЫХ ТЕМПЕРАТУР НА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ ЗА ПЕРИОД 1500–2004 ГГ.
Table 2. Five maximum peaks of the periodogram of the European annual temperature series for the period 1500-2004

Значение мощности	Частота	Период
(1) 8,308	0,0040	250 лет
(2) 1,961	0,0020	504 года
(3) 1,472	0,0060	166,7 лет
(4) 1,402	0,0337	29,7 лет
(5) 1,314	0,2778	3,6 года

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors

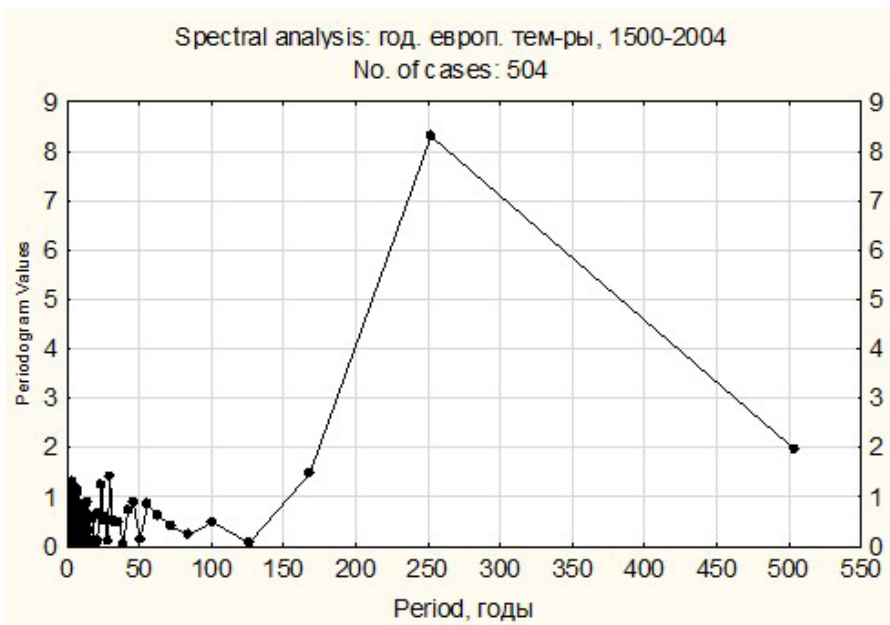


Рис. 2. Периодограмма мощности ряда европейских годовых температур за период с 1500 по 2004 гг.

Fig. 2. Periodogram of the power of the European annual temperature series for the period 1500-2004.

Источник: составлено авторами / Source: compiled by the authors.

Вейвлет-преобразование

Применим другой способ для выделения гармонических составляющих – вейвлет-преобразование, суть которого подробно описана в одной из первых работ на эту тему [18]. В работе [18] приводится сравнение преобразования Фурье и вейвлет-преобразования, в ней отмечается, что одномерное преобразование Фурье дает также одномерную информацию об относительном вкладе (амплитудах) разных временных масштабов (частот). Результатом вейвлет-преобразования одномерного ряда является двумерный массив амплитуд вейвлет-преобразования – значений коэффициентов $W(a, b)$. Распределение этих значений в пространстве (a, b) – (временной масштаб, временная локализация) дает информацию об эволюции относительного вклада компонент разного масштаба во времени и называется спектром коэффициентов вейвлет-преобразования. Таким образом, используя вейвлет-преобразование можно получить частотно-временное представление данных, то есть результаты вейвлет-анализа позволяют не только выделить основные периодичности масштабов, но и получить дополнительную информацию о временных интервалах проявления компонент различного масштаба и частоты.

Для обнаружения периодичности временных рядов в разных масштабах (в малых, средних и больших масштабах одновременно) с помощью вейвлет-преобразования была использована программа Past 4.15 [17].

На рисунке 3 представлена скалограмма коэффициентов вейвлет-преобразования в диапазоне масштабов, охватывающем практически все крупномасштабные детали процесса. В отличие от «объемного» спектрального анализа, вейвлет-преобразование в виде скалограммы демонстрирует видимые изменения силы и частоты сигнала с течением времени. Уровень значимости, соответствующий $p = 0,05$, можно изобразить в виде контура.

На рисунке 3 вертикальная ось (Y) на графике представляет собой логарифмическую шкалу размеров (\log_2), здесь же параллельно приведена шкала периодичностей в годах. Верхняя часть рисунка представляет собой подробный, мелкозернистый вид, в то время как нижняя часть представляет собой сглаженный обзор более дли-

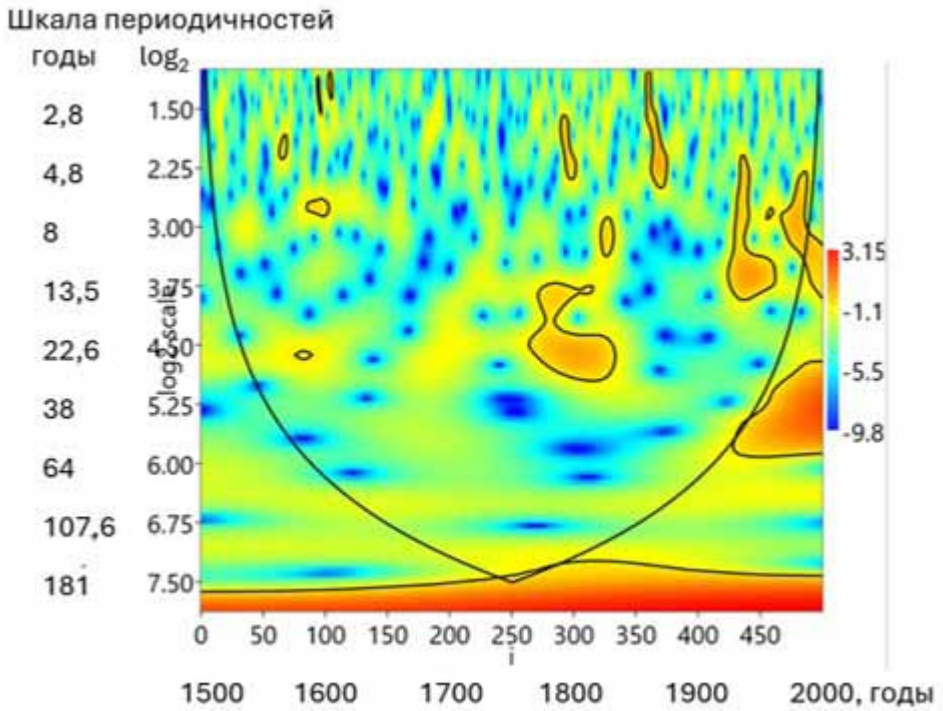


Рис. 3.

Скалограмма коэффициентов вейвлет-преобразования ряда европейской годовой температуры, 1500–2004 гг.

Fig. 3. Scalogram of the wavelet transform coefficients of the European annual temperature series, 1500-2004

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors.

тельных тенденций. Мощность сигнала показана в оттенках цветов (от темно-синего до оранжевого) справа от рисунка. По оси X на графике представлена длина временного ряда (505 точек), ниже – соответствие последовательности точек годам (от 1500 до 2004 гг.).

На рисунке 3 видно, что статистически значимые масштабы периодичностей в этом временном ряде не только присутствуют, но и эволюционируют. Так, например, периодичности с масштабами колебаний в 3–5 лет имеют место на протяжении всего исследуемого периода с 1500 по 2004 гг., а периодичности в 13,5–23 лет формировались в период с 1750 по 1850 гг. С 1900 года сформировались периодичности в 5–13 лет и в более поздний период с середины XX века – периоды от 30 до 60 лет. Крупномасштабный период в 181 год характерен для всего изучаемого интервала.

Анализ аномалий годовых температур Северного полушария и юга ЕТР в современный период 1961–2024 гг.

Как известно, с середины XX столетия началось существенное потепление глобального климата, при этом в Северном полушарии (СП) темпы и скорость роста приземной температуры существенно опережали этот процесс в Южном полушарии. Основной причиной такого различия явилось неравномерное распределение суши, большее количество которой приходится на Северное полушарие, а также антропогенный фактор, влияние которого более заметен в Северном полушарии.

Для визуального представления о поведении температуры относительно климатической нормы (среднего за 1961–1990 гг.), дающей представление о теплых и холодных периодах температурного режима, исследуем аномалии (отклонения от нормы – осредненного значения за 1961–1990 гг.) среднегодовых температур Северного полушария и годовых температур юга ЕТР с 1961 по 2024 гг. (рис. 4). Из рисунка 4 видно, что в современный период тренд температур Северного полушария демонстрирует устойчивый рост, скорость роста температур составляет $0,24\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет, вклад тренда в объясненную дисперсию $R^2 = 89\%$. С середины 80-х годов отсутствуют отрицательные аномалии годовых температур Северного полуша-

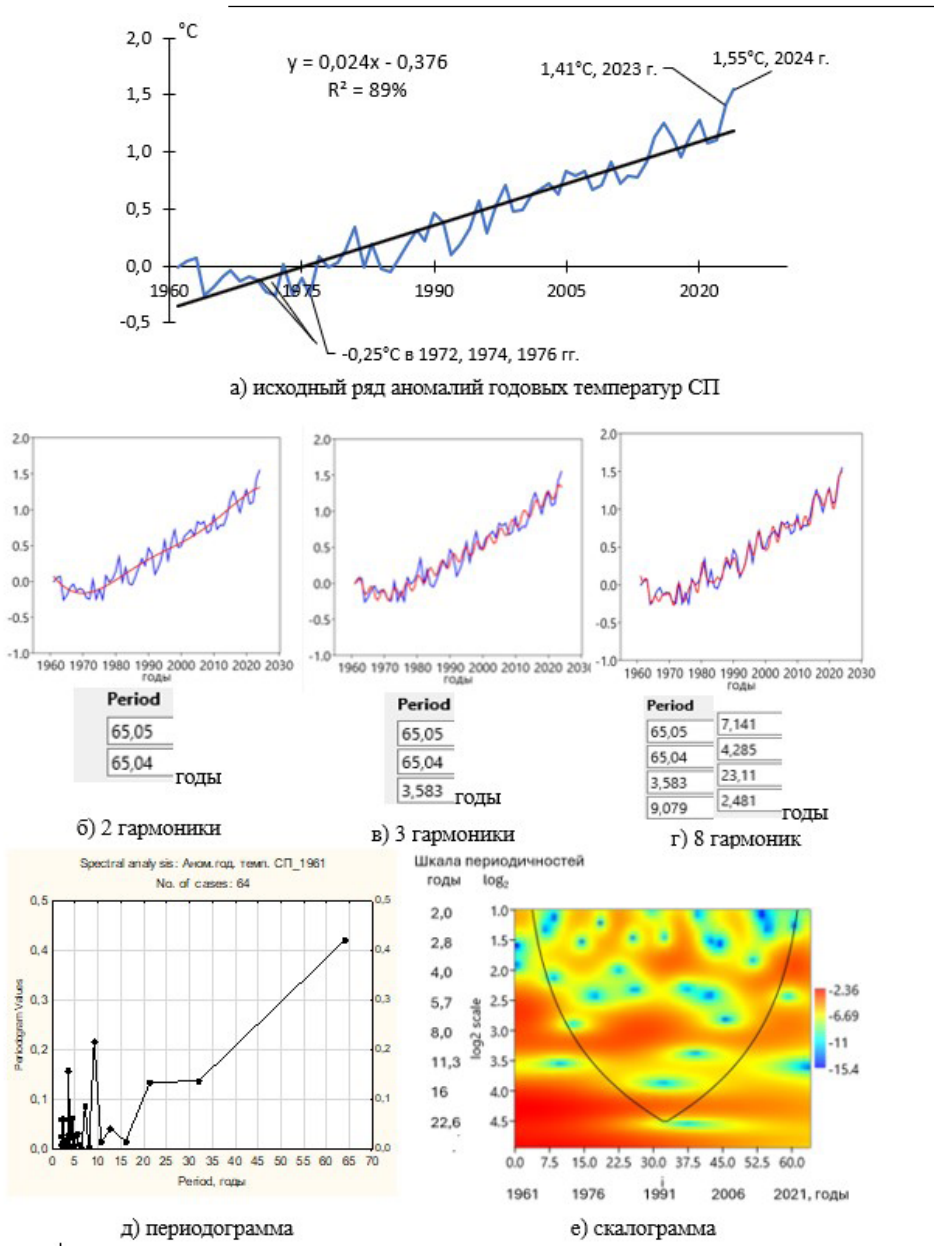


Рис. 4.

Исходный ряд аномалий (отн. 1961–1990 гг.) среднегодовых температур в Северном полушарии (а, синий) с линейным трендом, моделью синусоидальной регрессии (б–г, красный), периодограммой (д), скалограммой (е), 1961–2024 гг. Fig. 4. Original series of anomalies (relative to 1961–1990) of average annual temperatures in the Northern Hemisphere (a, blue) with a linear trend, a sinusoidal regression model (b–d, red), a periodogram (e), a scalogram (e), 1961–2024.

Источник: составлено авторами / Source: compiled by the authors.

рия. Максимальные положительные аномалии были зафиксированы в 2023 г. (+1,41 °С) и в 2024 г. (+1,55 °С). Наибольшие отрицательные аномалии (-0,25 °С) – в 1972, 1974 и 1976 гг.

Из рисунка 4, б видно, что модель синусоидальной регрессии при использовании двух гармоник в начале временного ряда (60–70-е гг.) демонстрирует снижение температуры, а с начала 70-х гг. – их устойчивое повышение. При трех гармониках (рис. 4, в) в модели выделяются в основном короткие внутридекадные периоды (3–4-летние). При увеличении количества гармоник до восьми добавляются 7–9-летние периоды и 23-летние (мультидекадные) периоды.

В таблице 3 представлены 5 пиков с наибольшими мощностями и соответствующими им периодами. Из периодограммы (рис. 4, д) видно, что из пяти пиков с наибольшими мощностями необходимо исключить пик с периодом, совпадающим с длиной ряда (64 года), а также пики, где функция монотонно возрастает (32 года и 21 год), остаются два пика с периодами 9 лет и 3,6 года, являющимися основными периодами в модели и формирующими поведение исходного ряда.

Таблица 3. ПЯТЬ МАКСИМАЛЬНЫХ ПИКОВ ПЕРИОДОГРАММЫ РЯДА АНОМАЛИЙ СРЕДНЕГОДОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ, 1961–2024 ГГ.
Table 3. Five maximum peaks of the periodogram of the series of annual mean temperature anomalies in the Northern Hemisphere, 19612024

Значение мощности	Частота	Период
(1) 0,4213	0,0156	64 года
(2) 0,2175	0,1094	9 лет
(3) 0,1582	0,2813	3,6 года
(4) 0,1385	0,0313	32 года
(5) 0,1356	0,046	21 год

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors.

На рисунке 5 представлен ход аномалии среднегодовой температуры на юге европейской территории России (ЕТР) с линейным трендом. Скорость роста годовой температуры на юге ЕТР составила $0,28 \text{ }^\circ\text{C}/10$ лет со вкладом тренда в объясненную дисперсию $R^2 = 37 \%$, линейный тренд статистически значим на 5%-м уровне. С 2000 года все аномалии годовых температур положительны, за исключением 2003 г. и 2011 г., где отрицательные аномалии имели всего лишь сотые ($-0,08 \text{ }^\circ\text{C}$) и десятые ($-0,2 \text{ }^\circ\text{C}$) доли градуса. Самые холодные годы на юге ЕТР – это 1976 г. ($-1,08 \text{ }^\circ\text{C}$) и 1993 г. ($-1,22 \text{ }^\circ\text{C}$). Максимальная отрицательная аномалия, имевшая место в 1993 г., явилась следствием статистически значимого отклика температуры приземного слоя Северного полушария на извержение вулканического аэрозоля в стратосферу (вулкан Пинатубо, Филиппины, 1991 г.), о чем подробно описано в работе [9]. Самые жаркие годы на юге ЕТР – это 2010 г. с превышением температуры относительно климатической нормы на $+2,29 \text{ }^\circ\text{C}$ и 2024 г. с превышением относительно нормы на $+2,13 \text{ }^\circ\text{C}$.

При использовании двух гармоник (рис. 5, б) имеем одинаковый вид модели синусоидальной регрессии – нелинейный тренд, демонстрирующий понижение температуры до середины 70-х гг. прошлого столетия и затем ее монотонный рост. Используя три гармоники в модели, добавляются короткие (внутридекадные) 5-летние периоды пульсации температур на фоне основного их роста с середины 70-х годов. И, наконец, 8 гармоник наиболее точно ($R^2 = 85 \%$) описывают исходный ряд с учетом амплитуд температур, добавляются как внутридекадные периоды (2–4-летние), так и более длительные 10-летние периоды.

В таблицу 4 внесены пять наиболее мощных пика, соответствующих периодам: 64 года, 4,92 года (~ 5 лет), 4 года, 2,2 года и 2,9 лет (~ 2 и 3 года), эти пики определяются на периодограмме (рис. 5д). За исключением периода в 64 года, совпадающего с длиной ряда, остальные периодичности (5 лет, 4 года, 2 и 3 года) определяют и формируют режим среднегодовой температуры на юге ЕТР за последние десятилетия.

Определим их временную масштабность на скалограмме, построенной с помощью вейвлет-преобразования (рис. 5, е). Из рисунка 5, е видно, что 23-летняя периодичность, которая имела место на

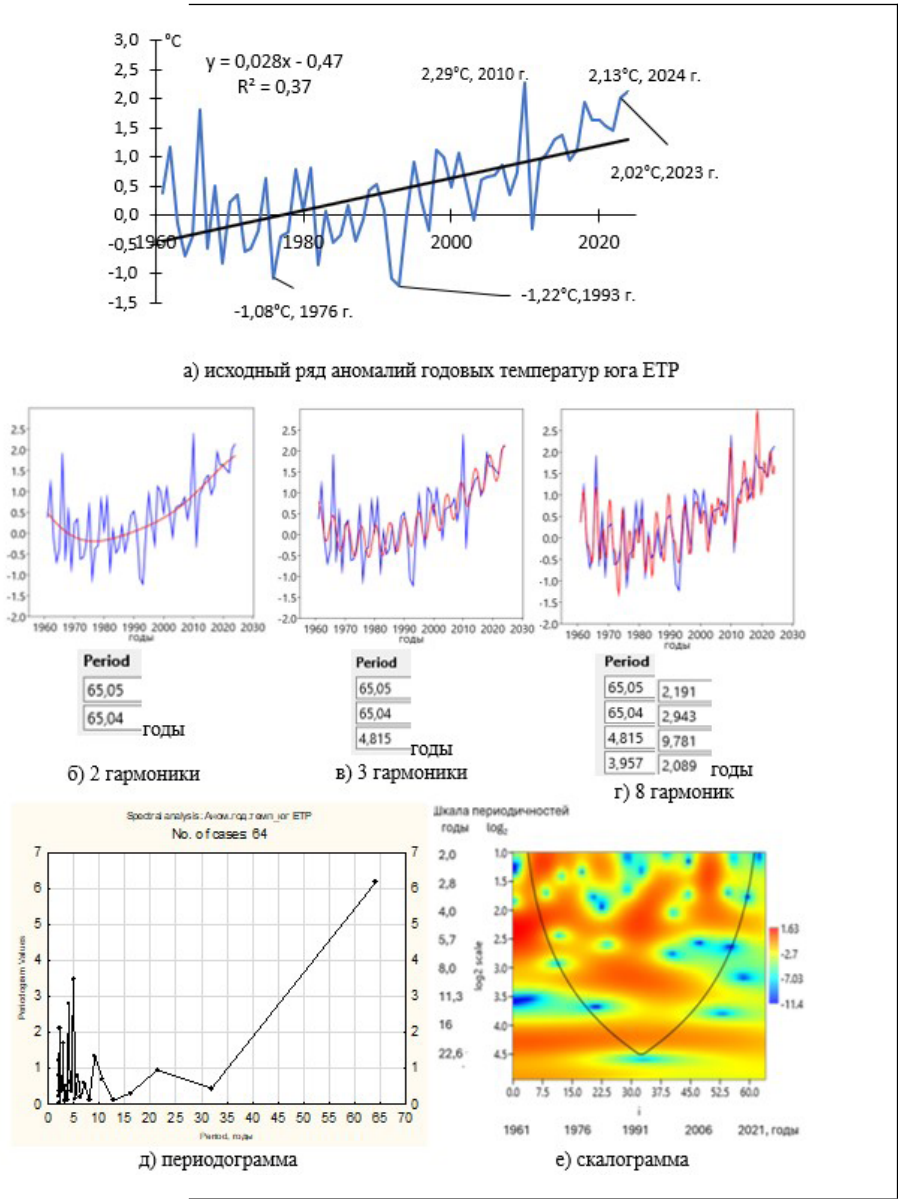


Рис. 5. Исходный ряд аномалий (отн.1961–1990 гг.) среднегодовых температур на юге ЕТР (а, синий) с линейным трендом, с моделью синусоидальной регрессии (б–г, красный), периодограммой (д), скалограммой (е), 1961–2024 гг.

Fig. 5. The original series of anomalies (relative to 1961–1990) of average annual temperatures in the south of the European Russia (a, blue) with a linear trend, with a sinusoidal regression model (b–d, red), periodogram (d), scalogram (e), 1961–2024

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors

Таблица 4. ПЯТЬ МАКСИМАЛЬНЫХ ПИКОВ ПЕРИОДОГРАММЫ РЯДА АНОМАЛИЙ СРЕДНЕГОДОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЮГЕ ЕТР, 1961–2024 гг.
Table 4. Five maximum peaks of the periodogram of the series of anomalies of average annual temperature in the south of the European Russia, 1961–2024

Значение мощности	Частота	Период
(1) 6,165	0,0156	64 года
(2) 3,451	0,2031	4,92 года
(2) 2,796	0,2500	4 года
(3) 2,115	0,4531	2,2 года
(4) 1,695	0,3438	2,9 года

Источник: составлено авторами.
Source: compiled by the authors.

всем исследуемом временном интервале 1961–2024 гг., не входит в пятерку периодов с максимальными мощностями сигнала (рис. 5, д). Так же, как в случае с предыдущими рядами выделяются внутридекадные 2–3–4-летние периодичности, которые были определяющими для юга России в периоды с начала 60-х гг. до 80-х гг. и с начала 90-х гг. до 2000-х гг.

Такая трансформация статистически значимых периодичностей, происходящая во второй половине XX века может быть объяснена сменой роли глобальных климатообразующих факторов, как естественного, так и антропогенного происхождения, что требует дальнейшего изучения.

Заключение

Анализ крупномасштабных временных рядов температур показал, что все тренды сезонных и годовых температур на европейской территории (1500–2004 гг.) положительные и статистически значимые на 5%-м уровне. За весь исследованный период (505 лет) в ряду годовых средних температур наблюдалось одинаковое количество экстремальных значений как выше, так и ниже пороговых, при этом все холодные экстремумы были определены до XX столетия, а все теплые экстремумы – в XX и в начале XXI века. Со второй половины XX века не было ни одного холодного экстремума в рядах сезонных температур.

Были выделены наиболее значимые периоды, формирующие режим ряда среднегодовой температуры на европейской территории за период с 1500 по 2004 гг., 30-летний период и 3–4-летняя квазипериодичность. Вейвлет-преобразование позволило определить периодичности временных рядов в разных масштабах, а именно, периодичности с масштабами колебаний в 3–5 лет были определены для всего исследуемого периода с 1500 по 2004 гг., а периодичности в 13,5–23 лет формировались в период с 1750 по 1850 гг. С 1900 года сформировались периодичности в 5–13 лет и в более поздний период с середины 20-го века – периоды от 30 до 60 лет.

С 1961 по 2024 гг. (современный период) тренд температур Северного полушария демонстрирует их устойчивый рост, скорость роста температур составляет $0,24\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет с высоким вкладом тренда в объясненную дисперсию ($R^2 = 89\%$). С середины 80-х годов отсутствуют отрицательные аномалии годовых температур Северного полушария. Скорость роста годовой температуры на юге ЕТР составила $0,28\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет со вкладом тренда в объясненную дисперсию $R^2 = 37\%$, линейный тренд ряда годовых температур юга ЕТР статистически значим на 5 %-м уровне. С 2000 года все аномалии годовых температур положительны.

В современный период как для Северного полушария, так и для юга ЕТР определяющими являются внутридекадные периодичности (2–3–4-летние). Из модели синусоидальной регрессии видно, что периодичность в 3 года, формирующая ряд, определяется как основная уже при использовании первых трех гармоник в модели. Далее по вкладу в формировании температурного режима добавляются 9–10 летние периоды, определяемые, вероятно, известной циклическостью солнечной активности.

Для выявления роли глобальных природных процессов в трансформации временных периодичностей наблюдаемого потепления в регионе в дальнейшем необходимо будет провести корреляционный анализ между вейвлет-спектрами среднегодовых температур Северного полушария и юга ЕТР и вейвлет-спектрами таких индексов атмосферной циркуляции, как индекс Северо-Атлантического колебания и индекс Восточная Атлантика/Западная Россия, как это было сделано для отдельных климатических зон юга ЕТР в работе [19].

Список источников

1. Folland CK et al. Observed climate variability and change. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, eds Houghton JT, et al. Cambridge, Cambridge Univ Press, UK, 2001. P. 99–181.
2. Michael E. Mann, Zhihua Zhang, Malcolm K. Hughes, Raymond S. Bradley, Sonya K. Miller, Scott Rutherford, Fenbiao Ni. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia // *PNAS*. 2008. Vol. 105 (36). P. 13252–13257.
3. Luterbacher J et al. Reconstruction of sea level pressure fields over the Eastern North Atlantic and Europe back to 1500 // *Clim Dyn*. 2002. No. 18. P. 545–561.
4. Борисенков Е. П., Песецкий В. М. Экстремальные природные явления в русских летописях XI–XVII вв. Ленинград: Гидрометеиздат, 1983. 240 с.
5. Клименко В. В., Микушина О. В. Необычная динамика глобальной температуры в начале XXI в.: естественные факторы против антропогенных // *История и современность*. 2011. № 2. С. 1–11.
6. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. Москва, 2025. 135 с.
7. Латонин М. М., Башмачников И. Л., Бобылёв Л. П. Явление арктического усиления и его движущие механизмы // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2020. Т. 13. №3. С. 3–19.
8. Глобальное обновление климатических данных ВМО от ежегодного до десятилетнего периода (2025–2029). URL: <https://wmo.int/files/wmo-global-annual-decadal-climate-update-2025-2029>
9. Пространственно-временное изменение климата юга европейской территории России, оценка его последствий, методы и модели адаптации АПК / Б. А. Ашабоков, Л. М. Федченко, А. А. Ташилова, Л. А. Кешева, Н. В. Теунова. Нальчик: Изд-во «Фрегат». 2020. 476 с.
10. Климатические изменения средних значений и экстремумов приповерхностной температуры воздуха на юге европейской территории России / Ашабоков Б. А., Ташилова А. А., Кешева Л. А., Теунова Н. В., Таубекова З. А. // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. № 1. С. 5–19.
11. Luterbacher J., Dietrich D., Xoplaki E., Grosjean M., Wanner H. European seasonal and annual temperature variability, trends and extremes since 1500. *Science*, 2004. Vol. 303, P. 1499–1503.
12. Hansen J., Ruedy R., Sato M., Imhoff M., et al. A closer look at United States and global surface temperature change. 2 of 9 30/09/2007 19:38J. *Geophys. Res.*, 2001. V. 106. No. 23, P. 947–963.
13. Mitchell T., Jones P. D. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int. J. Climatol.*, 2005. No. 25. P. 693–712.
14. Temperature. URL: www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature (дата обращения 27.04.2025)

15. Бююл А., Цефель П. SPSS: искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей. СПб.: ДиаСофтЮП, 2002. 608 с.
16. Боровиков В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере. СПб.: Питер, 2003. 688 с.
17. Hammer, Ø., Harper, D.A.T., and P. D. Ryan, PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Paleontologia Electronica*. 2001. V. 4. No.1. P. 9.
18. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения, *Успехи физических наук*. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145–1170.
19. Отклик температурного режима юга России на основные крупномасштабные атмосферные циркуляции Северного полушария / А. А. Ташилова, Б. А. Ашабоков, Л. А. Кешева, Н. В. Теунова // *Материалы III Всероссийской научно-практической конференции «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России»*. Иркутск, 2020. С. 114–119.

References

1. Folland CK, et al. Observed climate variability and change. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, eds Houghton JT, et al. Cambridge, UK, Cambridge Univ Press; 2001. p. 99-181.
2. Michael E. Mann, Zhihua Zhang, Malcolm K. Hughes, Raymond S. Bradley, Sonya K. Miller, Scott Rutherford, and Fenbiao Ni. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. *PNAS*. 2008;105(36): 13252-13257.
3. Luterbacher J, et al. Reconstruction of sea level pressure fields over the Eastern North Atlantic and Europe back to 1500. *Clim Dyn*. 2002;(18):545-561.
4. Borisenkov EP, Pesetskiy VM. Extreme natural phenomena in Russian chronicles of the 11th-17th centuries. Leningrad: Hydrometeoizdat; 1983. 240 p. (In Russ.).
5. Klimenko VV, Mikushina OV. Unusual dynamics of global temperature at the beginning of the 21st century: natural factors versus anthropogenic ones. *History and Modernity*. 2011;(2): 1-11. (In Russ.).
6. Report on the features of the climate in the territory of the Russian Federation for 2024. Moscow, 2025. 135 p. (In Russ.).
7. Latonin MM, Bashmachnikov IL, Bobylev LP. The phenomenon of Arctic amplification and its driving mechanisms. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2020;13(3): 3-19. (In Russ.).
8. WMO Global Annual to Decadal Climate Update (2025-2029). URL: <https://wmo.int/files/wmo-global-annual-decadal-climate-update-2025-2029>
9. Ashabokov BA, Fedchenko LM, Tashilova AA, Kesheva LA, Teunova NV. Spatio-temporal climate change in the south of European Russia, assessment of its consequences, methods and models of adaptation of the agro-

- industrial complex. Nalchik: Fregat Publishing House; 2020. 476 p. (In Russ.).
10. Ashabokov BA, Tashilova AA, Kesheva LA, Teunova NV, Taubekova ZA. Climatic changes in average values and extremes of surface air temperature in the south of European Russia. *Fundamental and Applied Climatology*. 2017;(1): 5-19.
 11. Luterbacher J, Dietrich D, Xoplaki E, Grosjean M, Wanner H. European seasonal and annual temperature variability, trends and extremes since 1500. *Science*. 2004;(303): 1499-1503. (In Russ.).
 12. Hansen J, Ruedy R, Sato M, Imhoff M et al. A closer look at United States and global surface temperature change. 2 of 9 30/09/2007 19:38 *Geophys. Res.* 2001;106(23): 947-963.
 13. Mitchell T, Jones PD. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int. Climatol.* 2005;(25): 693-712.
 14. Temperature. URL: www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature (date of access 27/04/2025)
 15. Buiul A, Tsefel P. SPSS: the art of information processing. Analysis of statistical data and restoration of hidden patterns. SPb.: DiaSoftUP; 2002. 608 p. (In Russ.).
 16. Borovikov V. *Statistica. The art of data analysis on a computer*. 2003. SPb.: Piter; 2003. 688 p. (In Russ.).
 17. Hammer Ø, Harper DAT, Ryan PD. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*. 2001;4(1): 9.
 18. Astafieva NM. Wavelet analysis: fundamentals of theory and application examples. *Advances in physical sciences*. 1996;166(11): 1145-1170. (In Russ.).
 19. Ashabokov BA, Tashilova AA, Kesheva LA, Teunova NV. Response of the temperature regime of the south of Russia to the main large-scale atmospheric circulations of the Northern Hemisphere. *Proceedings of the III All-Russian scientific and practical conference "Modern trends and prospects for the development of hydrometeorology in Russia"*. Irkutsk, 2020. P. 114–119. (In Russ.).

Информация об авторах

Борис Азреталиевич Ашабоков – доктор физико-математических наук, профессор, 1) заведующий отделом физики облаков Высокогорного геофизического института; 2) заведующий отделом Института информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН. Scopus ID: 6505916110, Researcher ID: K-4299-2015

Алла Амарбиевна Ташилова – доктор физико-математических наук, доцент, ВНС лаборатории микрофизики облаков Высокогор-

ного геофизического института, Scopus ID: 57191577384,
Researcher ID: K-4321-2015

Лара Асировна Кешева – кандидат физико-математических наук, СИС лаборатории атмосферных конвективных явлений Высокогорного геофизического института, Scopus ID: 57191577471, Researcher ID: K-4261-2015

Наталья Вячеславовна Теунова – кандидат физико-математических наук, СИС лаборатории микрофизики облаков Высокогорного геофизического института, Scopus ID: 57191571952, Researcher ID: K-4312-2015

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации статьи.

Information about the authors

Boris A. Ashabokov – Dr. Sci. (Phys. and Math.), professor, 1) Head of the Department of Cloud Physics, High Mountain Geophysical Institute; 2) Head of Department at the Institute of Informatics and Regional Management Problems, KBSC RAS Scopus ID: 6505916110, Researcher ID: K-4299-2015

Alla A. Tashilova – Dr. Sci. (Phys. and Math.), associate professor, Leading Researcher at the Laboratory of Cloud Microphysics High Mountain Geophysical Institute. Scopus ID: 57191577384, Researcher ID: K-4321-2015

Lara A. Kesheva – Cand. Sci. (Phys. and Math.), Senior Researcher at the Laboratory of Atmospheric Convective Phenomena High Mountain Geophysical Institute. Scopus ID: 57191577471, Researcher ID: K-4261-2015

Nataliya V. Teunova – Cand. Sci. (Phys. and Math.), Senior Researcher at the Laboratory of Cloud Microphysics High Mountain Geophysical Institute. Scopus ID: 57191571952, Researcher ID: K-4312-2015

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.