

Тенденции изменения основных климатических показателей на территории Приволжского федерального округа в XIX-XXI веках

Ю.П. Переведенцев^{1)}, Б.Г. Шерстюков²⁾, Н.А. Мирсаева¹⁾,
К.М. Шанталинский¹⁾, В.В. Гурьянов¹⁾*

¹⁾Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18

²⁾ВНИИГМИ-МЦД,
Россия, 249035, г. Обнинск, ул. Королева, д. 6

*Адрес для переписки: ypereved@kpfu.ru

Посвящается 210-летию образования
Метеорологической обсерватории
Казанского университета

Реферат. Рассмотрены долгопериодные колебания температуры воздуха на территории Приволжского федерального округа (ПФО) на фоне климатических изменений происходящих в XIX-XXI веках в Северном полушарии. Показано, что до 1970-х годов эти колебания носили противофазный характер, сменившиеся однонаправленным ростом температуры в регионе и на Северном полушарии в середине 1970-х годов. При этом скорость роста региональной температуры превышает полушарную. С использованием данных наблюдений на 183 метеостанциях, расположенных на территории ПФО, выявлены тенденции изменения температуры и атмосферных осадков в период 1966-2018 гг. Показано, что на всей территории округа происходит повышение температуры во всех месяцах года и наблюдается незначительное увеличение годовых сумм атмосферных осадков. Рассмотрено распределение индексов экстремальности зим и осадков на Европейской территории России. Установлена корреляционная связь между региональными изменениями температуры воздуха и индексами атмосферной циркуляции.

Ключевые слова. Температуры воздуха, атмосферные осадки, низкочастотная компонента, коэффициент корреляции, линейный тренд, индексы циркуляции атмосферы.

Trends in main climate indicators on the territory of the Volga Federal District in the XIX-XXI centuries

Yu.P. Perevedentsev¹⁾, B.G. Sherstyukov²⁾, N.A. Mirsaeva¹⁾,
K.M. Shantalinskii¹⁾, V.V. Guryanov¹⁾*

Kazan (Volga Region) Federal University,
18, Kremlevskaya str., 420008, Kazan, Russian Federation

RIHMI-WDC,
6, Koroleva str., 249035, Obninsk, Russian Federation

*Correspondence address: ypereved@kpfu.ru

Dedicated to the 210th anniversary of foundation
of Meteorological Observatory of Kazan University

Abstract. Long-term fluctuations in air temperature in the territory of the Volga Federal District (VFD) are considered against the background of climatic changes occurring in the 19th-21st centuries in the Northern Hemisphere. It is shown that until the 1970s these fluctuations were antiphase in nature, which were replaced by a unidirectional temperature increase in the region and in the Northern Hemisphere in the mid-1970s. At the same time, the growth rate of regional temperature exceeds the hemispheric one. Using observational data from 183 weather stations located on the territory of the Volga Federal District, trends in temperature and precipitation changes in the period 1966-2018 were revealed. It is shown that throughout the district there is an increase in temperature in all months of the year and a slight increase in annual precipitation is observed. The distribution of winter and precipitation extremeness indices on the European territory of Russia is considered. The correlation dependence of regional changes in air temperature on the nature of atmospheric circulation has been established.

Keywords. Air temperature, atmospheric precipitation, low-frequency component, correlation coefficient, linear trend, atmospheric circulation indices.

Введение

Проблема современных изменений окружающей природной среды и климата по-прежнему остается актуальной в связи с высокой вероятностью возникновения климатических угроз и необходимостью адаптации к происходящим климатическим изменениям. Эта тема, в частности, нашла отражение в статьях (Гладильщикова и др., 2019; Катцов и др., 2020). На международной конференции по климату в Глазго (Шотландия, ноябрь 2021 г.), участие в которой приняли представители 120 стран мира, в результате многочисленных дискуссий был принят ряд документов по смягчению воздействия на климатическую систему (ограничение вырубки лесов, выбросов метана, переход на энергосберегающие технологии и др.). Эта озабоченность

продиктована необходимостью сохранения климатической стабильности в регионах Земли, по-разному реагирующих на глобальные вызовы. Современное состояние Земного климата, характеризующегося активной фазой потепления, нашло свое обстоятельное освещение в Шестом оценочном докладе МГЭИК (2021 г.), а результаты ансамблевых расчетов будущих изменений основных климатических показателей с помощью глобальных моделей общей циркуляции атмосферы и океана представлены в проекте СМIP6.

В настоящей статье главное внимание уделено климатическим изменениям, происходящим на Востоке Русской равнины в XIX-XXI веках, где территориально располагается Приволжский федеральный округ (ПФО). Приволжский федеральный округ относится к числу наиболее развитых и густонаселенных регионов России, его территория составляет 1036 тыс. км² (6.1% от территории РФ), население 32 млн человек (21.9% от населения РФ), продукция промышленности и сельского хозяйства составляет около четверти от всей продукции страны. Происходящие климатические изменения и особенно опасные природные явления (засухи, природные пожары и т.п.) могут оказать неблагоприятное влияние на экономику и жизнедеятельность населения округа. В более ранних работах авторов настоящей статьи (Переведенцев и др., 2004; 2008; 2010; 2017) рассматривались отдельные вопросы региональных колебаний основных климатических показателей на фоне барико-циркуляционных процессов в Северном полушарии. Здесь к анализу привлекается более обширный материал за более длительный период.

Начало метеорологическим наблюдениям в Поволжье было положено в январе 1812 г. в связи с образованием при Казанском университете Метеорологической обсерватории (Переведенцев, 2001), впоследствии в XIX веке на территории Поволжья и Предуралья был открыт еще ряд метеостанций (в западной части региона в Пензе, Саратове, в восточной части в Перми, Уфе, Оренбурге и др.), что позволило изучить длиннопериодные колебания климата на территории ПФО. Развитие современных информационно-вычислительных технологий, свободный доступ к метеорологическим данным (183 станций) и данным реанализов (1979-2020 гг.) позволяют детально рассматривать пространственно-временную изменчивость климата и климатических ресурсов на территории ПФО в последние десятилетия (1966-2020 гг.). Следует отметить, что климатические изменения в ПФО исследуются нами на фоне происходящих событий в Северном полушарии и на территории России с учетом влияния как антропогенного фактора, так и естественных процессов, обусловленных влиянием циркуляции атмосферы и океана.

Исходные данные и методика исследования

Анализ современных глобальных и региональных изменений климата выполнен с привлечением данных о приземной температуре воздуха (ТВ) по всему земному шару (1850-2020 гг.) университета Восточной Англии (данные CRU) (Jones et al., 1999; Brohan et al., 2006), реанализа ERA5 (1979-2020 гг.). Расчеты выполнялись с использованием данных о температуре воздуха и

атмосферных осадков 183 метеостанций за 1966-2018 гг., расположенных в Поволжье и Предуралье из фонда ВНИИГМИ-МЦД, результатов многолетних метеорологических наблюдений на станции Казань, университет (1828-2020 гг.) и 12 длиннорядных станций на территории ПФО (1888-2018 гг.). Данные о циркуляционных индексах получены с сайта (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc>).

Вышеперечисленные исходные данные подвергались статистической обработке: определялись средние величины, средние квадратические отклонения (СКО), нормированные аномалии ТВ и осадков, амплитуда годового колебания, линейные тренды ТВ и осадков. Для оценки экстремальности климата рассматривались индексы экстремальности осадков и индексы суровости зим по методу А.В. Мещерской. Выделение низкочастотного компонента (НЧК) в метеорологических рядах осуществлялось с помощью низкочастотного фильтра Поттера. Для оценки вклада атмосферной циркуляции в изменения климатических параметров рассчитывались коэффициенты парной корреляции между температурой воздуха и индексами циркуляции: Северо-Атлантическим колебанием (NAO), Арктической осцилляцией (АО), колебанием Восточная Атлантика – Западная Россия (EAWR), Скандинавским колебанием (SCAND). Достоверность результатов оценивалась с помощью известных статистических критериев.

Анализ результатов

Рассматривались долгопериодные колебания температуры воздуха осредненной по территории ПФО в период 1888-2020 гг. (133-летний период) на фоне изменения температуры на суше Северного полушария (СП) и СП в целом. С этой целью в рядах аномалий среднегодовых, зимних и летних температур осредненных для территории суши СП, всего полушария и ПФО, рассчитанных относительно норм за 1961-1990 гг., выделялись низкочастотные колебания с периодом более 25 лет. Результаты представлены на рис. 1. Как видно из рис. 1, среднегодовые температуры всего СП и ПФО до 1970 г. изменялись в противофазе. Так, в 1940 г. аномалия среднегодовой температуры воздуха (СГТВ) для СП достигла максимума и составила $+0.1^{\circ}\text{C}$, а в ПФО отмечен минимум -0.5°C , т.е. в Поволжье наблюдалось похолодание. С 1970-х годов по 2020 г. среднегодовая температура в ПФО повысилась на 1.8°C , на суше СП на 1.6°C и на всем СП на 1.3°C , потепление в регионе происходило более интенсивно, чем в Северном полушарии.

В зимний период картина заметно отличается от среднегодовой (рис. 2). ТВ испытывает значительные колебания на территории ПФО. В целом за 133-летний период она повысилась на 4.6°C , причем с 1970-х годов по 2020 г. в фазу активного потепления на 3.5°C , в более ранний период 1888-1970-х годов происходили заметные колебания зимней ТВ в ПФО: в нижней (отрицательной) части плоскости рисунка в 1910 и 1950 гг. отмечалось ее повышение, а в 1888 и 1930-х годах отмечено похолодание. Колебание ТВ достигло амплитуды в 1.6°C . В то же время зимняя температура суши СП и всего СП изменя-

лась достаточно плавно. С начала до конца рассматриваемого периода она возросла на 2.3°C и 1.7°C соответственно.

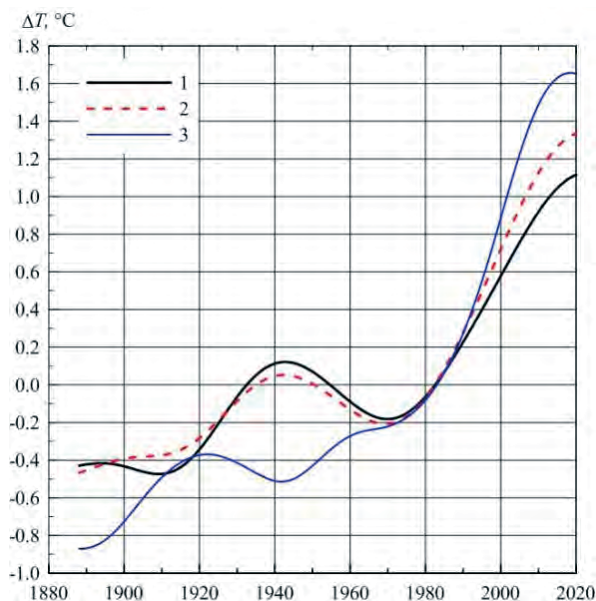


Рисунок 1. Многолетний ход НЧК аномалий среднегодовой температуры воздуха с периодом более 25 лет

1 – Северное полушарие, 2 – суша СП, 3 – ПФО

Figure 1. Long-term course of the LFC of anomalies of mean annual air temperature with a period of more than 25 years

1 – Northern Hemisphere, 2 – Northern landmass, 3 – VFD

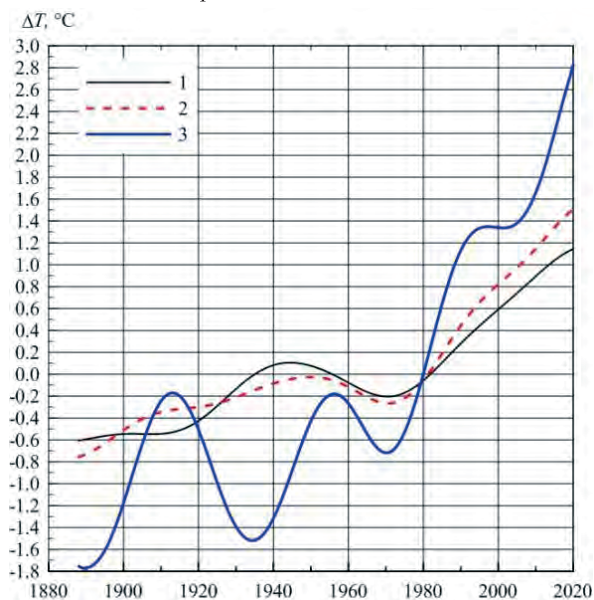


Рисунок 2. Многолетний ход НЧК аномалий средних зимних температур воздуха с периодом более 25 лет

1 – Северное полушарие, 2 – суша СП, 3 – ПФО

Figure 2. Long-term course of the LFC of anomalies of average winter air temperatures with a period of more than 25 years

1 – Northern Hemisphere, 2 – Northern landmass, 3 – VFD

В летний период (рис. 3) отмечаются значительные квазисинхронные колебания ТВ на всех рассматриваемых территориях. В период 1910-1915 гг. на территории современного ПФО отмечается минимум ТВ, в 1940 году – максимум, затем в 1970-1975 гг. вновь минимум температуры и, начиная с середины 1970-х годов, отмечается ее интенсивный подъем (потепление).

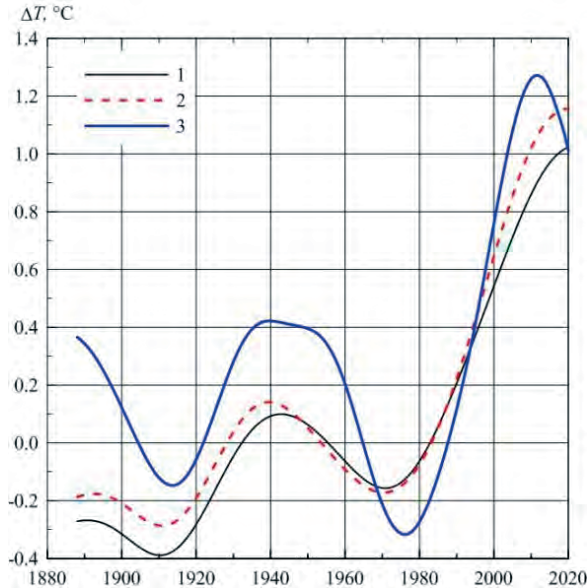


Рисунок 3. Многолетний ход НЧК аномалий средних летних температур воздуха с периодом более 25 лет
1 – Северное полушарие, 2 – суша СП, 3 – ПФО

Figure 3. Long-term course of the LFC of anomalies of mean summer air temperatures with a period of more than 25 years
1 – Northern Hemisphere, 2 – Northern landmass, 3 – VFD

При этом с 1975 г. по 2010 г. температура в ПФО повысилась на 1.6°C , следует отметить также, что повышение ТВ в Поволжье задерживается примерно на 5 лет относительно ее роста на суше и в СП в целом, где прирост ТВ на низкочастотной кривой с середины 1970-х годов составил $\sim 1.15^{\circ}\text{C}$.

Обнаруженный «горб» на низкочастотной кривой температуры воздуха в ПФО в период 1945-1975 гг. (рис. 3) можно объяснить с позиций учета двух факторов. В период 1915-1945 гг. в Северном полушарии в условиях повышенной прозрачности атмосферы для потоков коротковолновой радиации (в период 1918-1947 гг. прямая радиация была больше на 2%, чем в более ранний период 1888-1917 гг.) произошло возрастание температуры воздуха приблизительно на 0.6°C , что видно на рис. 1. Это событие подробно проанализировано в монографии (Будыко, 1971). Вторым фактором является вклад квазিশестидесятилетнего колебания в изменение температуры глобальной температуры, детально рассмотренный в монографии (Груза, Ранькова, 2012) для периода 1850-2011 гг., согласно которой это явление приводит к колебаниям температуры с амплитудой порядка 0.2°C и которое наиболее сильно проявилось в 1940 г. В работах (Логинов, Микуцкий, 2017; Переведен-

цев и др., 2021) также рассмотрено влияние квазишестидесятилетнего цикла на температуру в Северном полушарии.

В табл. 1 представлены характеристики низкочастотных изменений ТВ СП и ПФО в 1888-2020 гг. Как видно из табл.1, наблюдается достаточно неоднородная картина колебаний ТВ во времени и по территории. При этом величина скорости изменения ТВ $\Delta T/\Delta t$ ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) испытывает значительные колебания как по величине, так и по знаку. Следует выделить следующие особенности изменений ТВ в последние десятилетия: по всему СП – СГТВ в 1970-2020 гг. повысилась на 1.30°C со скоростью $0.26^{\circ}\text{C}/10$ лет, а в ПФО в период 1942-2020 гг. на 2.16°C со скоростью $0.28^{\circ}\text{C}/10$ лет.

Зимой ТВ Северного полушария в 1970-2020 гг. повысилась на 1.34°C со скоростью $0.27^{\circ}\text{C}/10$ лет и в ПФО в период 1970-2020 гг. – на 3.55°C со скоростью $0.77^{\circ}\text{C}/10$ лет.

Летом ТВ Северного полушария в 1971-2020 гг. повысилась на 1.18°C со скоростью $0.24^{\circ}\text{C}/10$ лет и в ПФО в период 1976-2012 гг. ТВ возросла на 1.59°C со скоростью $0.44^{\circ}\text{C}/10$ лет. Однако в 2012-2020 гг. в регионе произошло ее понижение на -0.26°C со скоростью $0.32^{\circ}\text{C}/10$ лет.

Таким образом, в ПФО колебания ТВ более значительны, а потепление последних десятилетий (с 1970-х годов) более интенсивно как зимой, так и летом, чем в СП в целом.

Таблица 1. Характеристики низкочастотных изменений ТВ Северного полушария, суши Северного полушария и Приволжского федерального округа 1888-2020 гг.

Table 1. Characteristics of low-frequency changes in the TV of the Northern Hemisphere, land of the Northern Hemisphere and the Volga Federal District 1888-2020

Регион	D, годы	DT, $^{\circ}\text{C}$	DT/Dt, $^{\circ}\text{C}/10$ лет
Год			
Северное полушарие	1888-1894 (6)	0.01	0.02
	1894-1909 (15)	-0.05	-0.04
	1909-1943 (34)	0.60	0.18
	1943-1970 (27)	-0.30	-0.11
	1970-2020 (50)	1.30	0.26
Приволжский федеральный округ	1888-1922 (34)	0.50	0.15
	1922-1942 (20)	-0.15	-0.07
	1942-2020 (78)	2.16	0.28
Зима			
Северное полушарие	1888-1902 (14)	0.06	0.04
	1902-1907 (5)	0.00	0.00
	1907-1944 (37)	0.65	0.18
	1944-1970 (26)	-0.31	-0.12
	1970-2020 (50)	1.34	0.27

Продолжение таблицы 1.

Регион	D, годы	DT, °C	DT/Dt, °C/10 лет
Приволжский федеральный округ	1888- 1913 (25)	1.60	0.66
	1913-1934 (21)	-1.35	-0.64
	1934-1956 (22)	1.34	0.61
	1956-1970 (14)	-0.54	-0.38
	1970-1997 (27)	2.07	0.76
	1997-2001 (4)	-0.01	-0.03
	2001-2020 (19)	1.49	0.78
Лето			
Северное полушарие	1888-1910 (22)	-0.12	-0.06
	1910-1943 (33)	0.49	0.15
	1943-1971 (28)	-0.26	-0.09
	1971-2020 (49)	1.18	0.24
	1970-2020 (50)	1.33	0.26
Приволжский федеральный округ	1888-1914 (26)	-0.51	-0.20
	1914-1940 (26)	0.57	0.22
	1940-1976 (36)	-0.74	-0.20
	1976-2012 (36)	1.59	0.44
	2012-2020 (8)	-0.26	-0.32

Примечание: Dt – период монотонного изменения низкочастотной компоненты температуры (годы), DT – величина изменения температуры (°C), DT/Dt – скорость изменения температуры (°C/10 лет).

Как видно из табл. 1, наблюдается неоднородная картина в распределении на территории СП и ПФО временных промежутков с однородным изменением температуры воздуха по продолжительности периодов и скорости изменения температуры, что свидетельствует о цикличности процессов изменения термического режима за достаточно длительный промежуток времени в 133 года.

При этом наблюдается смещение сроков начала и окончания однотипных периодов (роста и падения температуры воздуха) на территории СП и ПФО. Так, если в СП понижение ТВ по годовым данным наблюдалось в период 1943-1970 гг., зимой в 1944-1970 гг., летом в 1943-1971 гг. (периоды практически совпадают), то на территории ПФО эти события происходят по годовым данным соответственно в 1922-1940 гг., зимой в 1956-1970 гг., а летом в 1940-1976 гг. и в 2012-2020 гг.

Что касается основного повышения ТВ, обусловленного ролью антропогенных факторов, то в СП это происходило в 1969-2020 гг. (по годовым данным), в 1970-2020 гг. (по зимним) и в 1971-2020 гг. (по летним). На территории ПФО повышение ТВ наблюдалось в период 1942-2020 гг. (по годовым), в 1970-2020 гг. (зимой) и в 1976-2012 гг. (летом).

Как видно из табл. 2, внутри ПФО также возникают различия в изменениях температурного режима. Так, на юго-западе территории, по данным длиннорядных метеостанций Заметчино, Пенза, Октябрьский городок, Урюпинск, изменения температуры, как по линейному тренду, так и по кри-

вой НЧК, более существенны, чем на северо-востоке (станции Сыктывкар, Чердынь, Бисер, Пермь). Особенно это заметно по среднегодовым данным и в холодный период. В то же время в июле на северо-востоке (особенно по линейному тренду) потепление происходит более активно, чем на юго-западе. Так, в июле на северо-востоке величина прироста ТВ по линейному тренду составила 1.0°C , а на юго-западе лишь 0.26°C . При этом коэффициенты наклона линейного тренда (КНЛТ) в холодный период как на северо-востоке, так и на юго-западе заметно превышают соответствующие значения теплого периода (в холодный период КНЛТ соответственно равны 0.23 и $0.27^{\circ}\text{C}/10$ лет, а в теплый период 0.08 и $0.10^{\circ}\text{C}/10$ лет). Естественно, что и вклад линейного тренда в общую дисперсию температуры в холодный период значительно превышает таковой теплого периода.

Таблица 2. Характеристики низкочастотной компоненты температуры воздуха, осредненной по территории северо-востока и юго-запада ПФО, в период 1888-2020 гг.

Table 2. Characteristics of the low-frequency component of air temperature, averaged over the territory of the northeast and southwest of the Volga Federal District, in the period 1888-2020

Период	КНЛТ, $^{\circ}\text{C}/10$ лет	$\Delta T_{\text{тр}}$, $^{\circ}\text{C}$	ΔT_{F} , $^{\circ}\text{C}$	R2	R2F
Северо-восток					
Год	0.14	1.89	2.35	25	34
Холодный период	0.23	3.01	4.04	19	24
Зима	0.22	3.00	4.02	10	16
Январь	0.21	2.82	4.02	3	12
Теплый период	0.08	1.05	1.08	8	18
Лето	0.05	0.66	0.47	1	8
Июль	0.08	1.00	-0.04	1	7
Юго-запад					
Год	0.17	2.26	2.56	30	40
Холодный период	0.27	3.57	4.57	21	28
Зима	0.30	4.02	5.18	16	24
Январь	0.34	4.54	6.26	9	21
Теплый период	0.10	1.28	1.14	11	25
Лето	0.05	0.62	0.58	0	12
Июль	0.02	0.26	-0.16	0	11

Примечание: $\Delta T_{\text{тр}}$ – изменение температуры за весь период по линейному тренду, ΔT_{F} – то же по НЧК с периодом более 25 лет, R^2 – коэффициент детерминации линейного тренда, результат достоверен на уровне значимости в 5% при $R^2 \geq 1.5\%$; $R^2\text{F}$ – вклад НЧК в дисперсию ТВ.

В монографии (Логинов, Микуцкий, 2017) на основании линейных трендов нормированной температуры на суше Северного полушария показано, что в период с 1994 по 2012 гг. скорость роста температуры летом была выше, чем зимой. Расчет характеристик низкочастотной компоненты нормированных аномалий ТВ на северо-востоке и юго-западе ПФО в период 1988-2020 гг. показал, что на территории ПФО в зимний период скорость изменения норми-

рованной температуры превышает летние значения. Однако в период 1994-2012 гг. рост нормированной аномалии температуры на территории ПФО в летний период превышает зимний показатель, что согласуется с результатами (Логинов, Микуцкий, 2017).

Рассмотрим также долгопериодные характеристики температуры воздуха, осредненные по территории ПФО, по данным 12 длиннорядных станций, за период 1888-2020 гг. На рис. 4 и в табл. 3 представлены характеристики временного хода СГТВ, средней годовой, зимней и средней летней ТВ за 133-летний период.

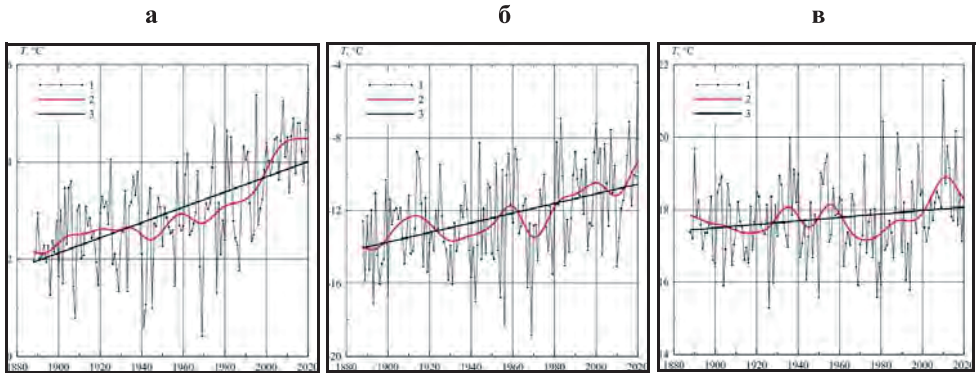


Рисунок 4. Колебания средней годовой (а), средней зимней (б) и средней летней (в) температуры воздуха, осредненной по территории ПФО, в период 1888-2020 гг.
 1 – исходный ряд, 2 – низкочастотная компонента с периодом более 10 лет, 3 – линейный тренд

Figure 4. Fluctuations in the average annual (a), average winter (b) and average summer (c) air temperature, averaged over the territory of the Volga Federal District, in the period 1888-2020
 1 – initial series, 2 – low-frequency component with a period of more than 10 years, 3 – linear trend

Таблица 3. Характеристики, осредненной по территории ПФО, температуры воздуха в 1888-2020 гг.

Table 3. Characteristics of air temperature averaged over the territory of the Volga Federal District in 1888-2020

Характеристика	Период				
	Год	Зима	Лето	Миним.ТВ	Максим.ТВ
A_v	2.97	-12.30	17.75	-15.01	19.55
R_{ms}	1.03	2.52	1.08	3.23	1.42
A	0.16	0.26	0.05	0.24	0.06
R^2L	33	15	1	7	1
α	0	0	5	0	8
R^2F	43	25	16	23	15

Примечание: A_v – среднее многолетнее значение, °C; R_{ms} – среднее квадратическое отклонение, °C; A – коэффициент наклона линейного тренда, °C/10 лет; R^2L – вклад в общую дисперсию линейного тренда, %; α – уровень значимости линейного тренда, %; R^2F – вклад в общую дисперсию низкочастотной компоненты с периодом более 10 лет, %.

Как видно из рис. 4 и табл. 3, следуя линейному тренду, СГТВ возросла на 2°C , средняя зимняя ТВ примерно на 3.5°C , средняя летняя на 0.5°C , средняя минимальная ТВ \sim на 3°C , средняя максимальная \sim на 0.8°C . Таким образом, потепление происходило значительно интенсивнее в холодное время года и в ночные часы.

В качестве одного из показателей изменчивости температурного режима в климатологии рассматривается поведение годовой амплитуды ТВ, расчеты которой были выполнены для территории ПФО. Как видно из рис. 5, в рассматриваемый период (1888-2020 гг.), согласно линейному тренду величина амплитуды уменьшилась с 35.9°C до 33.6°C со скоростью $-0.18^{\circ}\text{C}/10$ лет, что свидетельствует об уменьшении степени континентальности региона. При этом в период 1920-2020 гг. отчетливо прослеживается 40-летнее колебание годовой амплитуды ТВ. Годовая амплитуда ТВ характеризуется следующими показателями: средняя амплитуда за весь 133-летний период равна 34.64°C , ее СКО составляет 3.45°C . $\text{КНЛТ}=-0.18^{\circ}\text{C}/10$ лет, $R^2L=3\%$, $\alpha=2\%$, $R^2F=19\%$. Низкочастотная компонента имеет значительно больший вклад в дисперсию годовой амплитуды, чем линейный тренд.

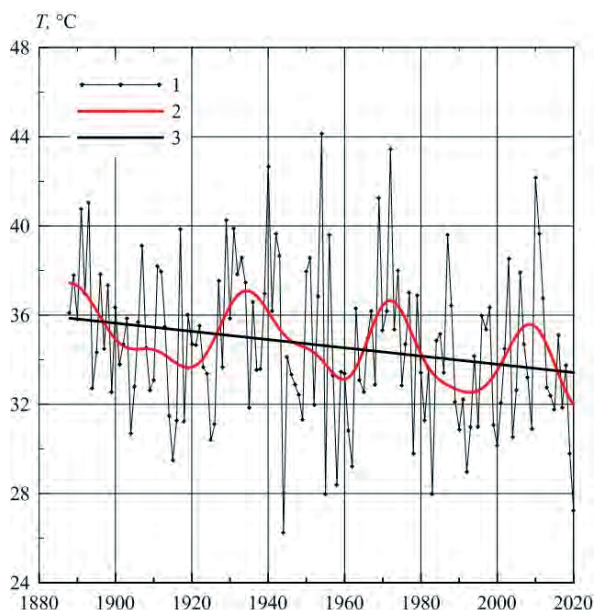


Рисунок 5. Колебания амплитуды годового хода температуры воздуха, осредненной по территории ПФО
1 – исходный ряд, 2 – НЧК с периодом более 25 лет, 3 – линейный тренд

Figure 5. Fluctuations in the amplitude of the annual variation of air temperature, averaged over the territory of the VFD

1 – initial series, 2 – LFC with a period of more than 25 years, 3 – linear trend

Для объяснения выявленной 40-летней цикличности амплитуды годового хода температуры, был рассмотрен также многолетний ход низкочастотной компоненты нормированных аномалий максимальной и минимальной годовых температур, осредненных по территории ПФО. Совместный анализ многолетнего хода низкочастотной компоненты нормированных аномалий

годовой амплитуды, максимальной и минимальной годовых температур показал, что максимум амплитуды годового хода в 30-е годы XX века связан с ростом максимальных температур и некоторым понижением минимальных, в то время как в 70-е годы XX столетия практически такой же максимум амплитуды определялся понижением как максимальных, так и минимальных температур, но понижение минимальных температур в этот период было существенно больше. В начале XXI столетия существенно меньший максимум амплитуды годового хода ТВ сформировался под влиянием наибольшего за исследуемый период роста максимальных температур и некоторого, на значительно более высоком фоне, понижения минимальных.

Для анализа пространственно-временной изменчивости построена карта распределения амплитуды годового хода ТВ на территории ПФО (рис. 6), согласно которой эта величина возрастает с 32°C на западе ПФО до 40°C на крайнем юго-востоке. Согласно распределению величины КНЛТ, наиболее заметное уменьшение континентальности происходит на юго-западе (КНЛТ=-0.20°C/10 лет), в северной и восточной частях региона эти изменения не столь существенны (КНЛТ понижается до -0.05°C/10 лет).

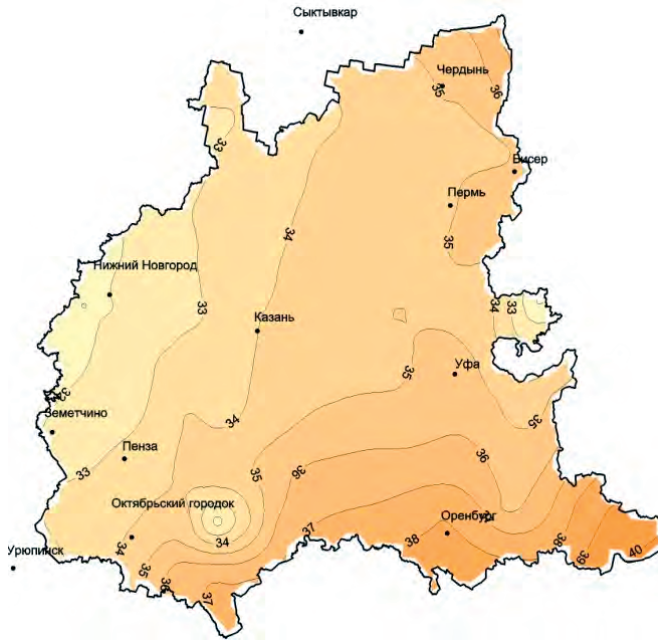


Рисунок 6. Распределение средней (1900-2020 гг.) годовой амплитуды температуры воздуха по территории ПФО

Figure 6. Distribution of the average (1900-2020) annual amplitude of air temperature over the territory of the Volga Federal District

Для оценки пространственно-временной изменчивости температуры воздуха и атмосферных осадков рассчитывались линейные тренды, по данным 183 станций на территории ПФО для периода 1966-2018 гг. Результаты расчетов для января, июля и года в целом представлены на картах (рис. 7). Как видно из рис. 7а, в январе на всей территории ПФО значения КНЛТ ТВ повсе-

местно положительны и меняются в пределах от 0.60 до 0.9°C/10 лет, при этом на северо-западе ПФО КНЛТ достигают максимальных значений (до 1.0°C/10 лет), а на юго-западе, южной окраине и особенно на юго-востоке (Оренбургская область) повышение температуры происходит с заметно меньшей скоростью (КНЛТ≈0.6-0.7°C/10 лет), чем на остальной территории. В июле (рис.7б), по-прежнему наблюдается рост ТВ на всей территории ПФО, но скорость потепления заметно ниже, чем в январе. На большей части территории региона значения КНЛТ меняются в пределах 0.20-0.39°C/10 лет и лишь на крайнем юго-западе отмечается более интенсивное потепление (скорость достигает 0.99°C/10 лет). Следует отметить, что в течение года процесс потепления происходит неоднородно: в январе и феврале в среднем по региону КНЛТ меняются от 0.6 до 0.8°C/10 лет, весной значение КНЛТ минимально (0.2°C/10 лет), в летний и осенний периоды скорость потепления также невелика (0.3-0.5°C/10 лет) относительно зимних показателей. Среднегодовая картина изменения СГТВ в период 1966-2018 гг. (рис.7в) отчетливо показывает, что в последние 53 года в западной части ПФО потепление происходило с заметно большей скоростью (0.50-0.68°C/10 лет), чем в восточной (0.20-0.39°C/10 лет). Наименьшие скорости потепления отмечаются на северо-востоке и юго-востоке региона. Рассчитанные коэффициенты детерминации R^2 линейных трендов указывают на статистическую значимость полученных результатов.

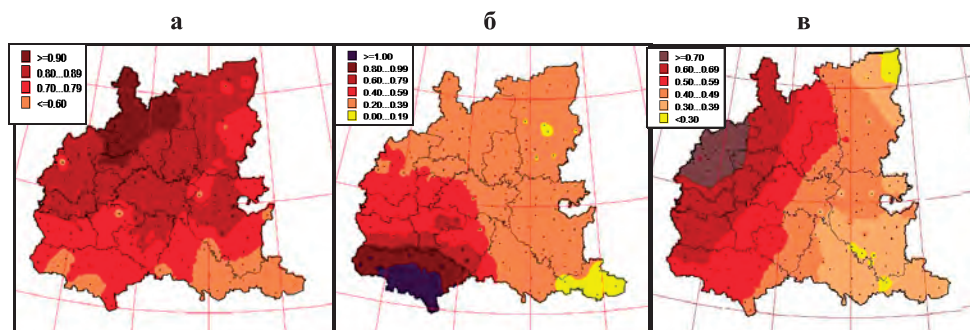


Рисунок 7. Тренды средней январской (а), июльской (б) и годовой (в) температуры за 1966-2018 гг. на территории ПФО

Figure 7. Trends in average January (a), July (b) and annual (c) temperatures for 1966-2018 on the territory of the VFD

Сравнение полученных трендов для среднегодовой ТВ с аналогичными показателями, полученными для территории всей России для периода 1976-2019 гг. в (Переведенцев и др., 2021) показывает, что во многих ее регионах потепление происходит более интенсивно, чем на территории ПФО, особенно на арктическом побережье Азиатской части России, где в районе полуострова Таймыр КНЛТ достигает 1.2°C/10 лет, в центральной и северных частях Сибири, в Карелии и на юго-западе Федерального округа.

Изменения термического режима ПФО находят свой отклик в прикладных характеристиках, одной из которых является режим отопительного периода.

С использованием данных метеорологических наблюдений на территории ПФО рассчитывалась продолжительность отопительного периода (ОП) в сутках (1966–2019 гг.). Продолжительность ОП на территории ПФО возрастает с юга на северо-восток в период 1966–2019 гг. от 168 до 208 суток, распределение этой характеристики носит квазизональный характер. Рассчитанный тренд продолжительности ОП за рассматриваемый период имеет отрицательный знак и свидетельствует о сокращении продолжительности ОП в среднем на территории ПФО со скоростью 1–2 дня/10 лет.

Важное значение для региона имеет режим атмосферных осадков и особенно их динамика во времени, учитывая большую роль ПФО в масштабах России в производстве сельскохозяйственной продукции (особенно зерновых). Рассмотрим карты распределения по территории округа коэффициентов наклона линейного тренда атмосферных осадков, рассчитанных для января, июля и года в целом (рис. 8). Следует отметить, что значения КНЛТ рассчитывались нами для всех месяцев года, что позволяет оценить их годовой ход. Как видно из данных рис. 8а, в январе величины КНЛТ меняются в пределах от -2.0 (юго-восток) до 4.0 мм/10 лет (северо-запад). Распределение КНЛТ по территории имеет пятнистый характер, что особенно заметно в июле. Если на западе и в центре ПФО в отдельных районах происходит рост сумм осадков, то на большей части территории и особенно на юго-востоке наблюдается их уменьшение. Годовая сумма осадков имеет на территории ПФО в основном положительный тренд за исключением небольшой территории в южной части региона. Наибольший прирост годовой суммы осадков происходит в северной части региона и особенно на северо-востоке, где КНЛТ достигает значения 28 мм/10 лет. В целом годовой прирост атмосферных осадков, если рассматривать месячные показатели, происходит за счет весеннего и раннего летнего периода. В декабре тренд осадков также положителен.

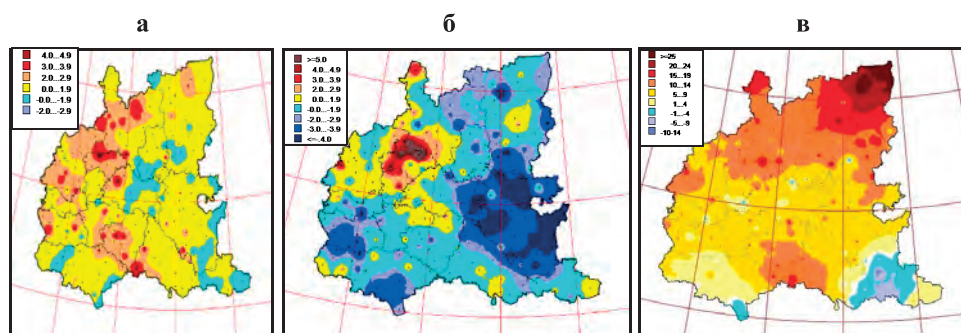


Рисунок 8. Тренды средних январских (а), июльских (б) и годовых (в) сумм осадков за 1966–2018 гг. на территории ПФО

Figure 8. Trends in average January (a), July (b) and annual (c) precipitation for 1966–2018 on the territory of the Volga Federal District

Следует отметить, что годовые тренды сумм осадков, построенных для территории России, также свидетельствуют об увеличении осадков на большей части ее территории за исключением юга ЕЧР, Северного Кавказа, где

КНЛТ ~ -10-14 мм/год, небольших очагов с уменьшением осадков на о. Новая Земля, юге Средней Сибири, северо-востоке Чукотки.

Для оценки степени увлажнения и засухливости вегетационного периода использовались гидротермический коэффициент ГТК (индекс Селянинова), рассчитываемый по формуле:

$$\text{ГТК} = \frac{10 \Sigma p}{\Sigma T_{>10^{\circ}}}$$

где Σp – сумма осадков (мм), $\Sigma T_{>10^{\circ}}$ – сумма среднесуточных температур ($^{\circ}\text{C}$) за период с $T \geq 10^{\circ}\text{C}$.

Расчеты ГТК производились для периода 1966-2019 гг. для 16 метеостанций ПФО. Полученные временные ряды подвергались статистическому анализу – строились линейные тренд и выделялись низкочастотные компоненты, что позволило выявить некоторое увеличение засухливости в южной части региона.

Как известно, погодные и климатические изменения в большой степени определяются атмосферной циркуляцией. В (Колобов, 1968) рассмотрены последствия вторжения на территорию Поволжья и Предуралья воздушных масс из различных регионов Северного полушария, оценена роль циклонических процессов. В более поздней работе (Переведенцев и др., 2013) отмечено, что к циркуляционным особенностям последних лет следует отнести увеличение повторяемости западной формы циркуляции и увеличение повторяемости опасных явлений погоды.

Для оценки влияния циркуляции атмосферы на термический режим региона рассчитывались коэффициенты корреляции r между временными рядами индексов атмосферной циркуляции (АО, NAO, EAWR, SCAND) и температурой воздуха на отдельных станциях. Указанные индексы рассчитывают на основании разложения полей давления и геопотенциала на эмпирическое ортогональные функции, они характеризуют временные изменения крупномасштабной циркуляции атмосферы и имеют географическую привязку (Попова, Шмакин, 2006).

Были построены карты корреляции для января и июля (рис. 9, 10). Выявились следующие особенности.

В январе с арктической осцилляцией (АО) связи более тесные в узкой полосе на западе региона (r достигает 0.45), на большей же части территории (в центре, на юге) коэффициент корреляции между ТВ и индексом АО порядка 0.4, при этом на крайнем северо-востоке связи самые слабые ($r \approx 0.3$). В июле влияние АО на термический режим региона заметно ослабевает особенно в южной половине ПФО, где r принимает значения 0.15-0.20. С индексом североатлантического колебания (NAO) в январе связи также более тесные в северо-западной части ПФО ($r = 0.45$), затем наблюдается уменьшение влияния NAO на температуру в направлении на юго-восток, где r понижается до 0.2. В июле на всей территории ПФО связи температуры воздуха с индексом NAO незначимы (r меняется от нулевого значения на севере до 0.12 на юге и юго-востоке).

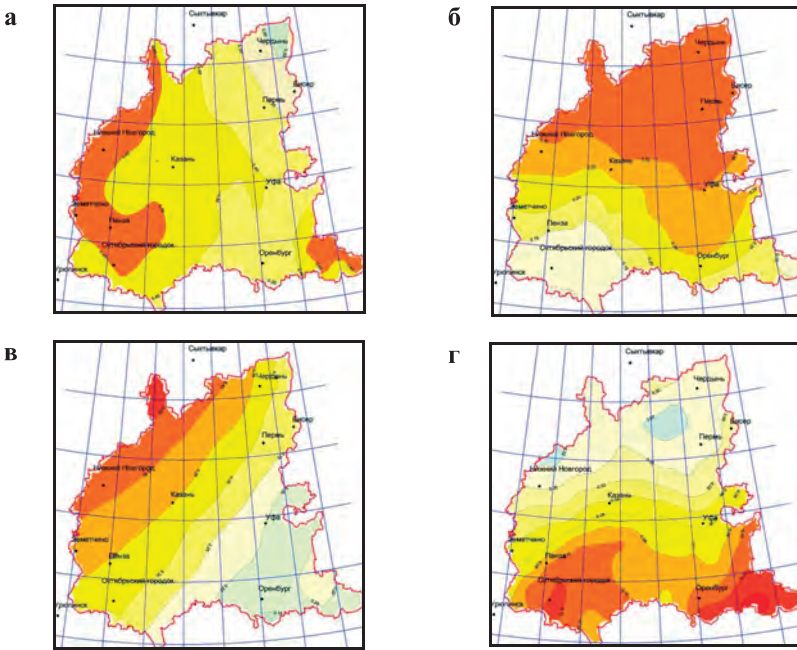


Рисунок 9. Коэффициенты корреляции между температурой воздуха на территории ПФО и индексом АО (а, б) и NAO (в, г), январь (а, в), июль (б, г)

Figure 9. Correlation coefficients between air temperature in the Volga Federal District and the AO (a, b) and NAO (c, d) indices, January (a, c), July (b, d)

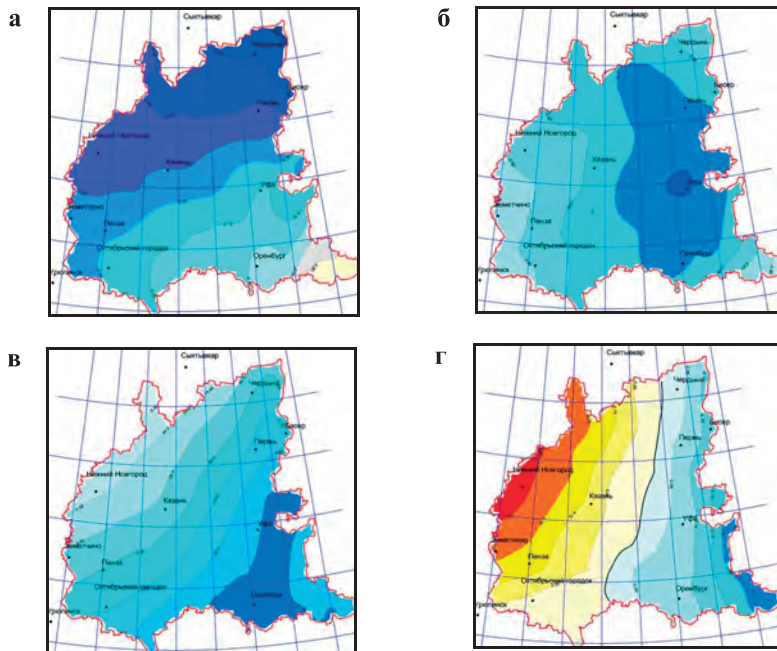


Рисунок 10. Коэффициенты корреляции между температурой воздуха на территории ПФО и индексом EAWR (а, б) и SCAND (в, г), январь (а, в), июль (б, г)

Figure 10. Correlation coefficients between air temperature in the Volga Federal District and the EAWR (a, b) and SCAND (c, d) index, January (a, c), July (b, d)

Таким образом, арктическая осцилляция и североатлантическое колебание оказывают заметное воздействие на термический режим региона в зимний период и прежде всего на его западную часть. Это воздействие положительное, т.е. атмосферная циркуляция способствует потеплению региона в зимний период.

Циркуляционная мода Восточная Атлантика-Западная Россия (EAWR) наибольшее влияние оказывает на термический режим ПФО в летний период, когда наблюдается нарастание величины r с запада на восток от значений $r = -0.60$ до $r = -0.75$ в Предуралье, что свидетельствует об охлаждающем влиянии Северной Атлантики в этот период. В январе влияние этой циркуляционной моды не существенно за исключением северо-восточного района, где $r = -0.45$.

Связь температуры воздуха с индексом SCAND в январе лучше выражена в центре и особенно на востоке территории (Зауралье, Оренбуржье), где r принимает отрицательное значение ($r = -0.6$). Таким образом, формирование блокирующего скандинавского антициклона заметно влияет на зимний термический режим востока ПФО и способствует понижению ТВ. В июле связь между компонентами лучше выражена на северо-западе ПФО ($r = 0.3$), в восточном направлении она ослабевает и меняет свой знак на отрицательный в Предуралье и на юго-востоке ПФО.

В целом результаты, полученные по региону, касающиеся статистических связей между индексами циркуляции атмосферы и колебаниями температуры воздуха, соответствуют основным положениям ранее выполненных работ (Крыжов, Горелиц, 2015; Попова, 2018, Бардин и др., 2019).

Согласно (Второй оценочный доклад..., 2014), современное потепление климата сопровождается ростом экстремальных явлений погоды, в более частом возникновении волн тепла и уменьшении волн холода в регионах страны. В работе (Переведенцев и др., 2019) дана оценка экстремальности зим на территории Татарстана в период 1954-2016 гг., по данным 13 метеостанций, согласно которой наиболее холодные зимы наблюдались в 1954-1982 гг. В настоящей статье территория исследования (Европейская часть России) и временной период (1900-2019 гг.) значительно расширены. В ней с использованием данных 95 метеостанций, расположенных на ЕЧР, по методике, изложенной в работе (Мещерская, Голод, 2015), рассчитывался интегральный показатель аномальности зим (α) по формуле:

$$\alpha = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta t_I}{\sigma_I} + \frac{\Delta t_{II}}{\sigma_{II}} \right)_K$$

где N – число метеорологических станций ($N = 95$), $\frac{\Delta t_I}{\sigma_I}$ и $\frac{\Delta t_{II}}{\sigma_{II}}$ – нормированные аномалии температуры воздуха по станциям за январь и февраль соответственно, σ_I , σ_{II} – средние квадратические отклонения температуры для этих месяцев.

При $\alpha < -0.9$ на ЕЧР зима считается экстремально холодной, в при $\alpha > 1.0$ экстремально теплой. Согласно расчетам, экстремально холодные зимы были

в 1911, 1912, 1917, 1929, 1940, 1942, 1950, 1954, 1956, 1969, 1972, 1985 гг., а экстремально теплые в 1925, 1944, 1995, 2002 гг. При этом величина коэффициента линейного тренда показателя α КНЛТ = 0.047 ед/10 лет, что свидетельствует об ослаблении суровости зим на ЕЧР. Вклад в общую дисперсию исходного ряда α низкочастотной компоненты с периодом более 15 лет составил 17%. Ход НЧК индекса суровости зим α выявил временные участки, на которых отмечалась наибольшая скорость изменения суровости зим. Так, с 1971 по 1997 гг. отмечается наибольшая скорость роста α , затем в 1997-2009 гг. (12 лет) наблюдалось увеличение суровости зим и с 2010 по 2019 гг. вновь наблюдалось уменьшение их суровости (рис. 11).

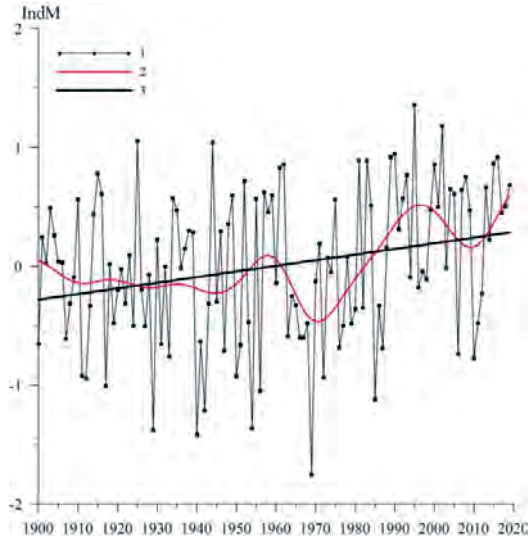


Рисунок 11. Индекс аномальности зим по Мещерской осредненный для территории Европейской части РФ

1 – исходный ряд, 2 – низкочастотная компонента с периодом более 10 лет,
3 – линейный тренд

Figure 11. Winter anomaly index for Meshcherskaya, averaged for the territory of the European part of the Russian Federation

1 – initial series, 2 – low-frequency component with a period of more than 10 years, 3 – linear trend

Для количественного описания экстремальных проявлений в изменениях современного климата широко используются индексы экстремальности (http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml). Индексы рассчитываются по суточным суммам осадков и данным о минимальной и максимальной температуре за сутки. И отображают экстремальность термического и влажностного режимов. Индексы были предложены в 1999 г. объединенной рабочей группой ВМО по обнаружению изменений климата (ККл/КЛИВАР) для описания экстремальных свойств климата на годовом отрезке времени (Платонова, 2008).

В качестве исходных данных были использованы ежечасные данные общего количества осадков в узлах сетки 0.25x0.25 градусов широты и долготы реанализа ERA5 за период 1980-2020 гг. Расчеты выполнены для области, ограниченной параллелями 40° и 80° с.ш. и меридианами 20° и 65° в.д. В

качестве выходных данных были получены средние многолетние значения индексов экстремальности (табл. 4) и их линейные тренды, отнесенные для удобства анализа к 10-ти летнему периоду (ед/10 лет). При расчете процентилей использовался базовый период 1981-2010 гг. В табл. 4 приведены только индексы, характеризующие экстремальность влажностного режима. Исследование экстремальности климата с использованием температурных индексов было опубликовано ранее в работе (Гурьянов, Сунгатуллин, 2021).

Таблица 4. Характеристики критериев экстремальности климата

Table 4. Characteristics of climate extremeness criteria

Наименование индекса	Описание индекса
Rx1day – максимальная суточная сумма осадков, мм	Максимальное количество осадков в году, выпавших за сутки
Rx5day, максимальная пентадная сумма осадков, мм	Максимальное количество осадков в году, выпавших за последовательные пять суток (индекс выявляет ситуации, ассоциируемые с возникновением дождевых паводков)
SDII – суточный индекс интенсивности осадков	Отношение годовой суммы осадков к числу дней (с осадками ≥ 1 мм/сутки) в году
R10mm – число суток с осадками ≥ 10 мм/сутки	Количество дней в году с суточной максимальной суммой осадков не менее 10 мм
R20mm – число суток с осадками ≥ 20 мм/сутки	Количество дней в году с суточной максимальной суммой осадков не менее 20 мм
R1mm – число суток с осадками ≥ 1 мм/сутки	Количество дней в году с суточной максимальной суммой осадков не менее 1 мм
CDD – максимальная продолжительность сухих периодов	Максимальное число последовательных сухих дней в году (с осадками < 1 мм/сутки)
CWD – максимальная продолжительность влажных периодов	Максимальное число последовательных влажных дней в году (с осадками ≥ 1 мм/сутки)
R95pTOT – сумма сильных осадков за год, мм	Годовая сумма сильных осадков (выше 95% процентиля распределения суточных сумм осадков за базовый период 1981-2010 в общем годовом количестве осадков)
R99pTOT – сумма очень сильных осадков за год, мм	Годовая сумма сильных осадков (выше 99% процентиля распределения суточных сумм осадков за базовый период 1981-2010 в общем годовом количестве осадков)
PRCPTOT – годовая сумма осадков, мм	Годовое количество осадков во влажные дни

Для оценки изменения климата на территории ЕЧР с использованием индексов экстремальности осадков было получено пространственно-временное распределение средних значений индексов экстремальности осадков за 1980-2020 гг., а также рассчитаны значения коэффициентов наклона линейных трендов (КНЛТ) для 11 индексов экстремальности режима увлажнения. На рис. 12 представлены средние годовые суммы осадков в мм (индекс PRCPTOT, а) и тенденции их изменения в мм/10 лет (б).

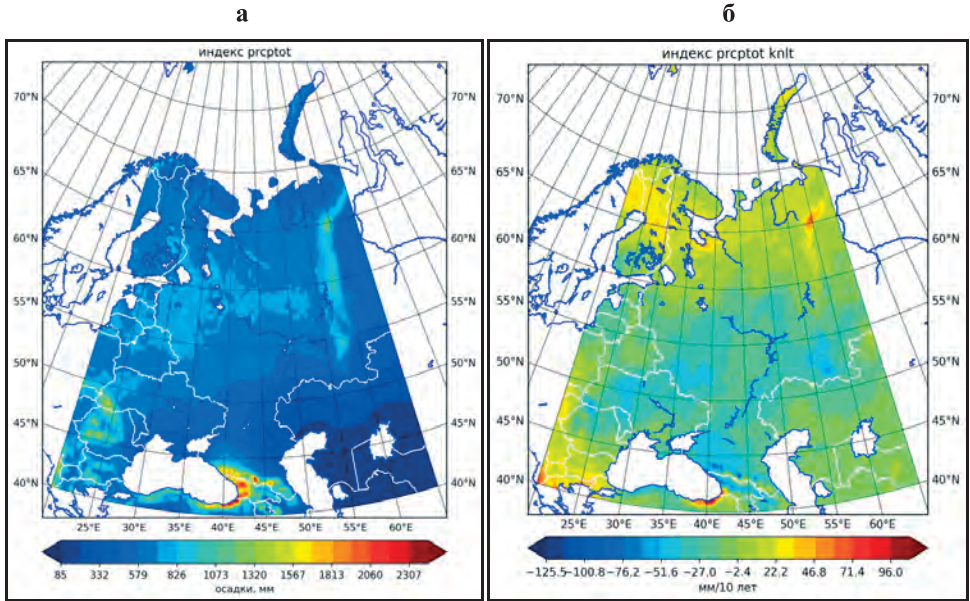


Рисунок 12. Среднее многолетнее (1980-2020гг.) значение индекса PRCPTOT на территории ЕЧР

а) – средние значения, мм; б) – значения КНЛТ, мм/10 лет

Figure 12. Long-term average (1980-2020) value of the PRCPTOT index in the ER

а) – average values, mm; б) – LTSC value, mm/10 years

Годовая сумма осадков PRCPTOT на территории Русской равнины меняется примерно от 570 мм на юге до 820 на севере (рис. 12а). При этом КНЛТ составляет -30-50 мм/10 лет на севере и юге и около -10 мм/10 лет на Средней Волге (рис. 12б). На большей части территории ЕЧР годовая сумма осадков близка к этим значениям с минимумом около 100 мм в низовьях Волги и максимумом около 2100 мм на Кавказе. КНЛТ индекса PRCPTOT на ЕЧР изменяется от -90 мм/10 лет на юге до +60 мм/10 лет на севере.

Представляет интерес сравнить индекс общего количества осадков PRCPTOT с индексами сильных осадков R95pTOT и R99pTOT. На рис. 13 представлен индекс R95pTOT, характеризующий годовую сумму сильных осадков (выше 95% процентиля распределения суточных сумм осадков по отношению к базовому периоду 1981-2010 гг.). Из сравнения рис. 12а и 13а видно примерно четырехкратное уменьшение индекса R95pTOT по отношению к индексу RCPTOT на большей части ЕЧР. При этом их тренды понижаются в меньшей степени и в средней полосе меняются от -15 до +15 мм/10 лет (рис. 13б). Индекс очень сильных осадков R99pTOT сохраняет тенденцию убывания и еще примерно в 3 раза меньше индекса R95pTOT. А тенденции его изменения сохраняют подобие пространственного распределения и меняются в средней полосе от -10 до +10 мм/10 лет. Обращает на себя внимание, что изолинии на рис. 12 и 13 в средних широтах ориентированы с юго-запада на северо-восток.

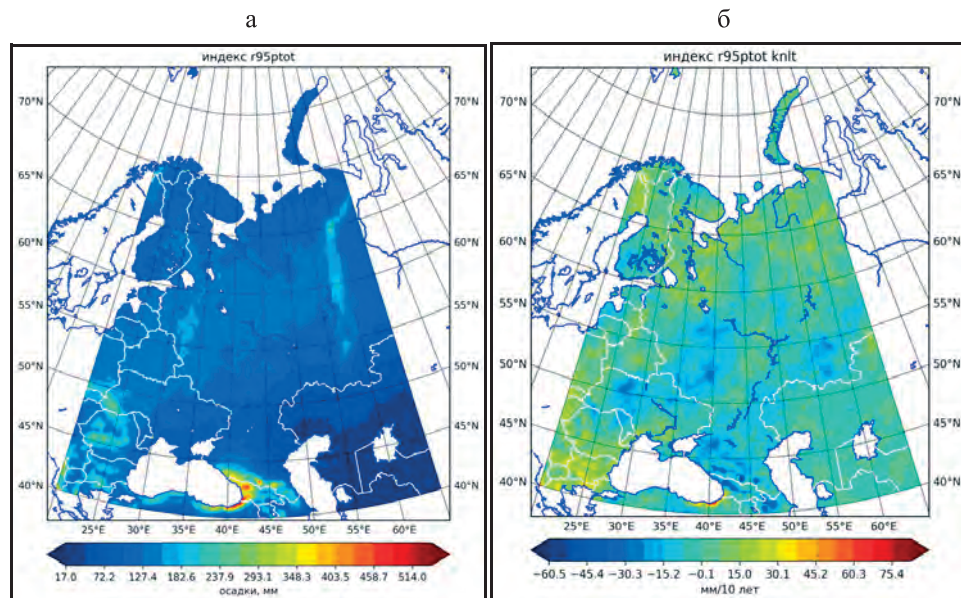


Рисунок 13. Среднее многолетнее (1980-2020гг.) значение индекса сильных осадков R95pTOT на территории ЕЧР

а) – средние значения, мм; б) – значения КНЛТ, мм/10 лет

Figure 13. Long-term average (1980-2020) value of the heavy precipitation index R95pTOT in the ER

а) – average values, mm; б) – LTSC value, mm/10 years

Индексы R1mm, R10mm и R20mm характеризуют число суток с осадками ≥ 1 мм/сутки, ≥ 10 мм/сутки и ≥ 20 мм/сутки соответственно. Распределение индекса R1mm в средней полосе ЕЧР (рис. 14а) характеризуется ростом от 130 дней на юге до 160 дней на севере. При этом тренд показывает уменьшение числа дней с осадками выше 1 мм/сутки на 1-4 дня за 10 лет (рис. 14б). В целом, на ЕЧР индекс R1mm также возрастает с юга на север от 180 до 225 дней, за исключением предгорий Кавказа (225 дней). Минимальные значения индекса R1mm до 50 дней наблюдаются в низовьях Волги. КНЛТ индекса R1mm на ЕЧР меняется от -6 дней/10 лет на юге и до 5 дней/10 лет на севере и Кавказе. Индекс R10mm в средней полосе составляет 10-20 дней с трендом -1.5+1.0 дней за 10 лет. На большей части ЕЧР R10mm составляет также 10-20 дней с минимумом в несколько суток в низовьях Волги и максимумом до 70 дней на черноморском побережье и в горах Кавказа. КНЛТ индекса R10mm на ЕЧР меняется от -3 дней/10 лет на юге и в средней полосе до +3 дней/10 лет на севере. Индекс R20mm на большей части ЕЧР составляет 4-6 дней с трендом -0.3+0.5 дней за 10 лет.

Важными климатическими параметрами являются индексы CWD и CDD характеризующие непрерывную продолжительность влажных и засушливых дней с осадками ≥ 1 мм/сутки и < 1 мм/сутки соответственно. На рис. 15 представлен индекс CDD.

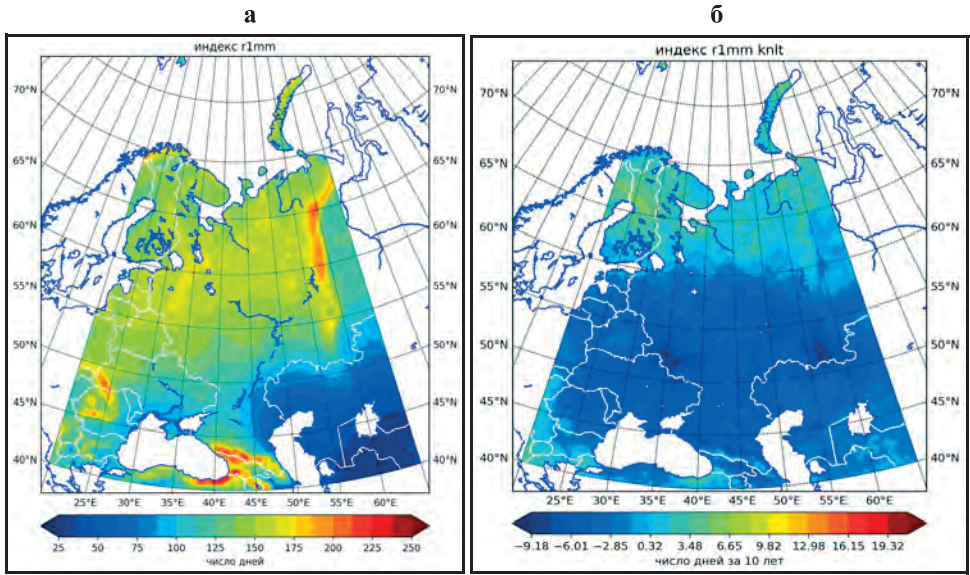


Рисунок 14. Среднее многолетнее (1980-2020гг.) значение индекса R1mm на территории ЕЧР
а) – среднее число дней; б) – значения КНЛТ (число дней/10 лет)

Figure 14. Long-term average (1980-2020) value of the R1mm index in the ER
a) – average number of days; б) – LTSC value (number of days / 10 years)

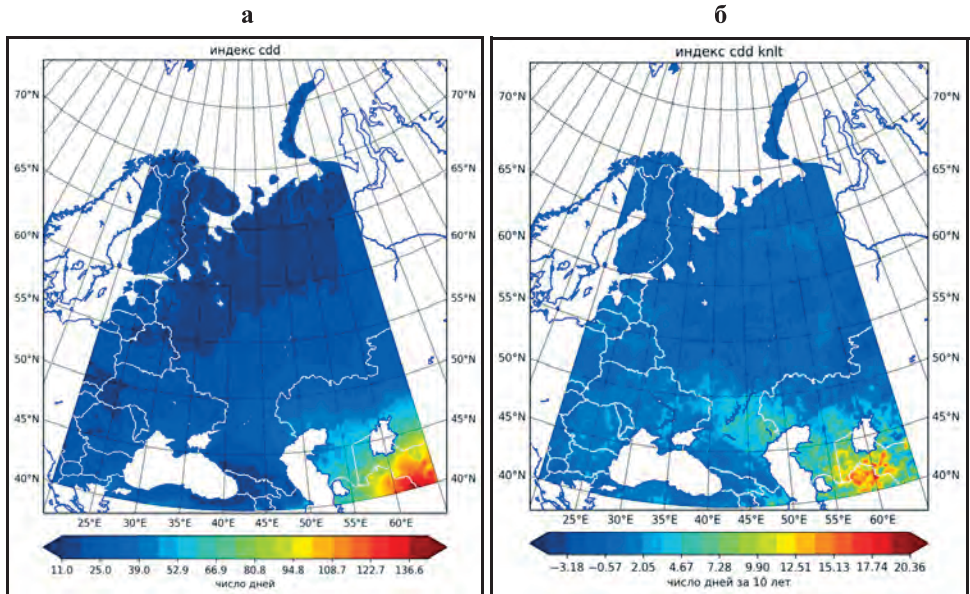


Рисунок 15. Среднее многолетнее (1980-2020гг.) значение индекса CDD на территории ЕЧР
а) – среднее число дней; б) – значения КНЛТ (число дней/10 лет)

Figure 15. Average long-term (1980-2020) value of the CDD index in the ER
a) – the average number of days; б) – LTSC value (number of days / 10 years)

Максимальная продолжительность сухих периодов в среднем составляет 10-25 дней, она возрастает с севера на юг на ЕЧР (рис. 15а). Тенденции изме-

нения индекса на большей части ЕЧР невелики и изменяются от небольших отрицательных значений до небольших положительных. Максимальная продолжительность влажных дней (индекс CWD) по абсолютной величине существенно меньше продолжительности сухих дней, и на большей части ЕЧР в среднем составляет 6-10 дней, возрастая с севера на юг. Исключение составляют Уральские горы (20дней) и Кавказ (около 35 дней).

Суточный индекс интенсивности осадков (SDII) на большей части ЕЧР меняется незначительно и составляет 4-5 мм/сутки. Тренды этого индекса не превышают по абсолютной величине 0.3 мм/сутки/10 лет.

Индексы Rx1day и Rx5day характеризуют максимальное количество осадков за одни и за пять суток соответственно. Индексы Rx1day (рис. 16) и Rx5day на большей части ЕЧР составляют 25-35 мм (рис. 16а) и 50-70 мм соответственно. Тренды этих индексов распределены по пространству крайне неравномерно. Даже в умеренных широтах ЕЧР тренд Rx1day составляет -2 мм/10 лет (-2.8 мм/10 лет для Rx5day) на западе (рис. 16б) и +3 мм/10 лет в Приволжье (+4 мм/10 лет для Rx5day). Для остальной территории ЕЧР эти значения отличаются не очень сильно.

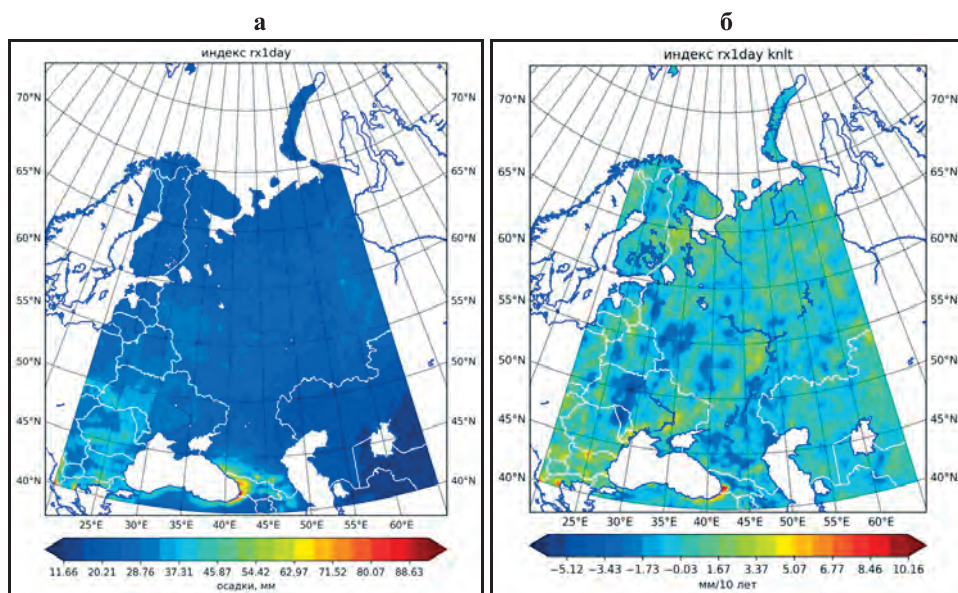


Рисунок 16. Среднее многолетнее (1980-2020гг.) значение индекса максимальных суточных сумм осадков Rx1day на территории ЕЧР
а) – средние значения, мм; б) – значения КНЛТ, мм/10 лет

Figure 16. Long-term average (1980-2020) value of the index of maximum daily precipitation Rx1day in the territory of the ER
а) – average values, mm; б) – LTSC value, mm/10 years

Таким образом, распределение индексов экстремальности климата по территории ЕЧР в указанный период зависит от широтной инсоляции, западно-восточного переноса, удаленности от Атлантического океана (континентальность климата) и орографических особенностей.

В целом рассчитанные влажностные индексы экстремальности климата по реанализу ERA5 соответствуют общим тенденциям изменения современного климата: осадки в средней полосе ЕЧР демонстрируют некоторое уменьшение. На севере ЕЧР и в Предуралье складываются условия, благоприятные для режима увлажнения.

Основные результаты

В настоящей статье были рассмотрены основные особенности пространственно-временного изменения ряда климатических параметров на территории Приволжского федерального округа в XIX-XXI веках, что позволило сделать следующие выводы:

1. Долгопериодные колебания среднегодовой температуры воздуха в ПФО и на Северном полушарии в период 1888-1970 гг. происходят в противофазе, начиная с середины 1970-х годов наблюдается согласованный ход температуры (рост) как на территории Северного полушария, так и в ПФО. При этом прирост СГТВ за последние десятилетия составил в СП 1.3°C , а в ПФО 1.8°C .

2. В период 1888-2020 гг. среднезимняя температура повысилась в ПФО на 4.6°C , в СП на 2.3°C ; в летний период колебания ТВ происходили в ПФО и СП квазисинхронно за 133-летний период и ее прирост для ПФО составил 1.1°C , а для СП 1.25°C . Однако в период 1975-2010 гг. это повышение составило 1.6°C и 1.15°C соответственно.

3. Получены характеристики низкочастотных изменений температуры воздуха для зимы, лета и в целом за год для Северного полушария, суши СП и ПФО. Выявлены периоды и скорости монотонного изменения ТВ, свидетельствующие о неоднородном характере долгопериодных колебаний.

4. Показаны различия в долгопериодных изменениях ТВ (1888-2020 гг.) на территории ПФО, по данным длиннорядных станций, где зимой и в целом за год на юго-западе потепление происходит более интенсивно, чем на северо-востоке.

5. В период 1888-2020 гг. годовая амплитуда температуры воздуха осредненная по территории ПФО уменьшилась с 35.9°C до 33.6°C со скоростью $-0.18^{\circ}\text{C}/10$ лет, что свидетельствует об уменьшении континентальности климата региона.

6. Построенные, по данным 183 станций, тренды ТВ и атмосферных осадков в период 1966-2018 гг. выявили повсеместный рост СГТВ на территории ПФО со скоростью от 0.27 до $0.57^{\circ}\text{C}/10$ лет (наиболее активно потепление происходит в январе), годовая сумма осадков в целом по ПФО возрастает. При этом в весеннее и раннее летнее время (июнь) наблюдается прирост осадков, а в июле на большей части ПФО особенно на юго-востоке количество осадков уменьшается.

7. Выявлены достоверные статистические связи между индексами атмосферной циркуляции (АО, NAO, EAWR и SCAND) и колебаниями температуры в регионе. Показано, что зимой атмосферная циркуляция более интенсивно действует на западные районы (положительная связь между ТВ и

индексами АО, NAO), SCAND зимой действует на восток региона (связь отрицательная), а колебание EAWR летом более эффективно влияет на восток ПФО с отрицательным знаком.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-55-00014) и РНФ и Кабинета Министров Республики Татарстан в рамках научного проекта № 22-27-20080."

Список литературы

Бардин, М.Ю., Платова, Т.В., Самохина, О.Ф. (2019) Изменчивость антициклонической активности в умеренных широтах Северного полушария, *Фундаментальная и прикладная климатология*, № 3, с. 32-58.

Будыко, М.И. (1971) *Климат и жизнь*, Л., Гидрометеиздат, 472 с.

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2014) М., Росгидромет, 1535 с.

Гладильщикова, А.А., Дмитриева, Т.М., Семенов, С.М. (2019) Специальный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата «Глобальное потепление на 1,5°C», *Фундаментальная и прикладная климатология*, вып. 4, с. 5-18.

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я. (2012) *Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха*, Обнинск, ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 194 с.

Гурьянов, В.В., Сунгатуллин, А.К. (2021) Распределение температурных индексов экстремальности на территории Европейской части России в период 1980-2019 гг., *Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле*, т. 31, вып. 4, с. 437-442.

Катцов, В.М., Хлебникова, Е.И., Школьник, И.М., Рудакова, Ю.Л. (2020) Вероятностное сценарное прогнозирование регионального климата как основа разработки адаптационных программ в экономике Российской Федерации, *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 46-58.

Колобов, Н.В. (1968) *Климат Среднего Поволжья*, Казань, Изд-во Казан. ун-та, 250 с.

Крыжов, В.Н., Горелиц, О.В. (2015) Арктическая осцилляция и ее влияние на температуру и осадки в Северной Евразии в XX в., *Метеорология и гидрология*, № 11, с. 5-19.

Логинов, В.Ф., Микуцкий, В.С. (2017) *Изменения климата: тренды, циклы, паузы*, Минск, Беларуская навука, 190 с.

Мещерская, А.В., Голод, М.П. (2015) Каталоги аномальности зим на территории России, *Труды ГГО*, вып. 579, с. 129-161.

Переведенцев, Ю.П. (2001) *Метеорология в Казанском университете: становление, развитие, основные достижения*, Казань, Изд-во Казан. ун-та, 128 с.

Переведенцев, Ю.П., Верещагин, М.А., Наумов, Э.П., Шанталинский, К.М. (2004) Особенности проявления современного потепления климата в тропосфере Атлантико-европейского региона, *Метеорология и гидрология*, № 2, с. 38-47.

Переведенцев, Ю.П., Исмагилов, Н.В., Шерстюков, Б.Г., Наумов, Э.П., Шанталинский, К.М., Гоголь, Ф.В. (2008) Современные изменения климата Республики Татарстан, *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, № 2, с. 13-23.

Переведенцев, Ю.П., Френкель, М.О., Шаймарданов, М.З. (2010) *Современные изменения климатических условий и ресурсов Кировской области*, Казань, Изд-во Казан. ун-та, 240 с.

Переведенцев, Ю.П., Васильев, А.А., Шанталинский, К.М., Гурьянов, В.В. (2017) Климатические изменения приземных полей атмосферного давления и температуры воздуха в умеренных широтах Северного полушария, *Метеорология и гидрология*, № 7, с. 81-99.

Переведенцев, Ю.П., Шумихина, А.В., Шанталинский, К.М., Гурьянов, В.В. (2019) Опасные гидрометеорологические явления на территории Приволжского федерального округа, *Метеорология и гидрология*, № 12, с. 20-30.

Переведенцев, Ю.П., Шерстюков, Б.Г., Шанталинский, К.М., Гурьянов, В.В., Аухадеев, Т.Р. (2020) Климатические изменения в Приволжском федеральном округе в XIX-XXI веках, *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 36-46.

Переведенцев, Ю.П., Васильев, А.А., Шерстюков, Б.Г., Шанталинский, К.М. (2021) Климатические изменения на территории России в конце XX – начале XXI века, *Метеорология и гидрология*, № 10, с. 14-26.

Переведенцев, Ю.П., Рахимов, И.И., Шерстюков, Б.Г., Шанталинский, К.М. (2021) Влияние современных климатических изменений на фенологию и поведение птиц, *Гидрометеорология и образование*, № 2, с. 28-46.

Платова, Т.В. (2008) *Климатические изменения температуры воздуха и атмосферных осадков во второй половине 20 века на территории Российской Федерации*, Автореферат дисс. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук, М., 31 с.

Попова, В.В., Шмакин, А.Б. (2010) Региональная структура колебаний температуры приземного воздуха в Северной Евразии во второй половине XX – начале XXI веков, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 46, № 2, с. 161-175.

Попова, В.В. (2018) Современные изменения климата на севере Евразии как проявление вариаций крупномасштабной атмосферной циркуляции, *Фундаментальная и прикладная климатология*, № 1, с. 84-111.

Jones, P.D. et al. (1999) Surface air temperature and its variations over the last 150 years, *Rev. Geophys.*, vol. 37, pp. 173-199.

Brohan, P. et al. (2006) Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new dataset from 1850, *J. Geophys. Res.*, vol. 111, pp. 1-35.

References

Bardin, M.Yu., Platova, T.V., Samohina, O.F. (2019) *Izmenchivost' anticiklonicheskoy aktivnosti v umerennyh shirotah Severnogo polushariya* [Variability of anticyclonic activity in temperate latitudes of the Northern Hemisphere], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, no. 3, pp. 32-58.

Budyko, M.I. (1971) *Klimat i zhizn'* [Climate and life], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 472 p.

Vtoroj ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii [The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation] (2014) Rosgidromet, Moscow, Russia, 1535 p.

Gladil'shchikova, A.A., Dmitrieva, T.M., Semenov, S.M. (2019) *Special'nyj doklad Mezhpripravitel'stvennoj grupy ekspertov po izmeneniyu klimata «Global'noe poteplenie na 1.5°C»* [Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change "Global Warming of 1.5°C"], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, issue 4, pp. 5-18.

Gruza, G.V., Ran'kova, E.YA. (2012) *Nablyudaemye i ozhidaemye izmeneniya klimata Rossii: temperatura vozduha* [Observed and expected climate changes in Russia: air temperature], VNIIGMI-WDC, Obninsk, Russia, 194 p.

Gur'yanov, V.V., Sungatullin, A.K. (2021) *Raspredelenie temperaturnyh indeksov ekstremal'nosti na territorii Evropejskoj chasti Rossii v period 1980-2019 gg.* [Distribution of temperature indices of extremeness on the territory of the European part of Russia in the period 1980-2019], *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Biologiya. Nauki o Zemle*, vol. 31, issue 4, pp. 437-442.

Katcov, V.M., Hlebnikova, E.I., Shkol'nik, I.M., Rudakova, Yu.L. (2020) *Veroyatnostnoe scenarnoe prognozirovanie regional'nogo klimata kak osnova razrabotki adaptacionnyh programm v ekonomike Rossijskoj Federacii* [Probabilistic Scenario Forecasting of the Regional Climate as a Basis for the Development of Adaptation Programs in the Economy of the Russian Federation], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 5, pp. 46-58.

Kolobov, N.V. (1968) *Klimat Srednego Povolzh'ya* [The climate of the Middle Volga], Izd-vo Kazan. un-ta, Kazan', Russia, 250 p.

Kryzhov, V.N., Gorelic, O.V. (2015) *Arkticheskaya oscillyaciya i ee vliyanie na temperaturu i osadki v Severnoj Evrazii v XX v.* [Arctic oscillation and its influence on temperature and precipitation in Northern Eurasia in the 20th century], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 11, pp. 5-19.

Loginov, V.F., Mikuckij, V.S. (2017) *Izmeneniya klimata: trendy, cikly, pauzy* [Climate change: trends, cycles, pauses], *Belaruskaya navuka*, Minsk, 190 p.

Meshcherskaya, A.V., Golod, M.P. (2015) *Katalogi anomal'nosti zim na territorii Rossii* [Catalogs of anomalous winters in Russia], *Trudy GGO*, issue 579, pp. 129-161.

Perevedencev, Yu.P. (2001) *Meteorologiya v Kazanskom universitete: stanovlenie, razvitie, osnovnye dostizheniya* [Meteorology at Kazan University: formation, development, main achievements], Izd-vo Kazan. un-ta, Kazan', Russia, 128 p.

Perevedencev, Yu.P., Vereshchagin, M.A., Naumov, E.P., Shantalinskij, K.M. (2004) Osobennosti proyavleniya sovremennogo potepleniya klimata v troposfere Atlantiko-evropejskogo regiona [Features of the manifestation of modern climate warming in the troposphere of the Atlantic-European region], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 2, pp. 38-47.

Perevedencev, Yu.P., Ismagilov, N.V., Sherstyukov, B.G., Naumov, E.P., Shantalinskij, K.M., Gogol', F.V. (2008) Sovremennye izmeneniya klimata Respubliki Tatarstan [Modern climate change in the Republic of Tatarstan], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya*, no. 2, pp. 13-23.

Perevedencev, Yu.P., Frenkel', M.O., Shajmardanov, M.Z. (2010) *Sovremennye izmeneniya klimaticeskikh uslovij i resursov Kirovskoj oblasti* [Modern changes in climatic conditions and resources of the Kirov region], Izd-vo Kazan. un-ta, Kazan', Russia, 240 p.

Perevedencev, Yu.P., Vasil'ev, A.A., Shantalinskij, K.M., Gur'yanov, V.V. (2017) Klimaticheskie izmeneniya prizemnyh polej atmosfernogo davleniya i temperatury vozduha v umerennyh shirotah Severnogo polushariya [Climatic changes in surface fields of atmospheric pressure and air temperature in temperate latitudes of the Northern Hemisphere], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 7, pp. 81-99.

Perevedencev, Yu.P., Shumihina, A.V., Shantalinskij, K.M., Gur'yanov, V.V. (2019) Opasnye gidrometeorologicheskie yavleniya na territorii Privolzhskogo federal'nogo okruga [Dangerous hydrometeorological phenomena on the territory of the Volga Federal District], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 12, pp. 20-30.

Perevedencev, Yu.P., Sherstyukov, B.G., Shantalinskij, K.M., Gur'yanov, V.V., Auhadeev, T.R. (2020) Klimaticheskie izmeneniya v Privolzhskom federal'nom okruge v XIX-XXI vekah [Climate Changes in the Volga Federal District in the 19th-21st Centuries], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 6, pp. 36-46.

Perevedencev, Yu.P., Vasil'ev, A.A., Sherstyukov, B.G., Shantalinskij, K.M. (2021) Klimaticheskie izmeneniya na territorii Rossii v konce XX – nachale XXI veka [Climate Changes on the Territory of Russia at the End of the 20th – Beginning of the 21st Century], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 10, pp. 14-26.

Perevedencev, YU.P., Rahimov, I.I., SHERstyukov, B.G., SHantalinskij, K.M. (2021) Vliyanie sovremennykh klimaticeskikh izmenenij na fenologiyu i povedenie ptic [The impact of modern climate change on the phenology and behavior of birds], *Gidrometeorologiya i obrazovanie*, no. 2, pp. 28-46.

Platova, T.V. (2008) *Klimaticheskie izmeneniya temperatury vozduha i atmosferynyh osadkov vo vtoroj polovine 20 veka na territorii Rossijskoj Federacii* [Climatic changes in air temperature and precipitation in the second half of the 20th

century on the territory of the Russian Federation], Extended abstract of candidate's thesis, Moscow, Russia, 31 p.

Popova, V.V., Shmakin, A.B. (2010) Regional'naya struktura kolebanij temperatury prizemnogo vozduha v Severnoj Evrazii vo vtoroj polovine XX – nachale XXI vekov [Regional Structure of Surface Air Temperature Variations in Northern Eurasia in the Second Half of the 20th – Early 21st Centuries], *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, vol. 46, no. 2, pp. 161-175.

Popova, V.V. (2018) Sovremennye izmeneniya klimata na severe Evrazii kak proyavlenie variacij krupnomasshtabnoj atmosfernoj cirkulyacii [Modern Climate Changes in the North of Eurasia as a Manifestation of Large-Scale Atmospheric Circulation Variations], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, no. 1, pp. 84-111.

Jones, P.D. et al. (1999) Surface air temperature and its variations over the last 150 years, *Rev. Geophys.*, vol. 37, pp. 173-199.

Brohan, P. et al. (2006) Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new dataset from 1850, *J. Geophys. Res.*, vol. 111, pp. 1-35.

Статья поступила в редакцию (Received): 30.01.2022.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 30.03.2022.

Принята к публикации (Accepted): 22.05.2022.

Для цитирования / For citation:

Переведенцев, Ю.П. Шерстюков, Б.Г., Мирсаева, Н.А., Шанталинский, К.М., Гурьянов В.В. (2022) Тенденции изменения основных климатических показателей на территории Приволжского федерального округа в XIX-XXI веках, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 8, № 2, с. 209-237, doi:10.21513/2410-8758-2022-2-209-237.

Perevedentsev, Yu.P. Sherstyukov, B.G. Mirsaeva, N.A., Shantalinskii, K.M., Guryanov V.V. (2022) Trends in main climate indicators on the territory of the Volga Federal District in the XIX-XXI centuries, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 8, no. 2, pp. 209-237, doi:10.21513/2410-8758-2022-2-209-237.