



УДК 551.513:551.509
ГРНТИ 37.23.17

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА НА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В ХОЛОДНЫЙ ПЕРИОД ГОДА

*Т.Н. ЗАДОРЖНАЯ, кандидат географических наук, доцент
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
В.П. ЗАКУСИЛОВ, кандидат географических наук, доцент
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
Д.В. БУЧНЕВ, кандидат технических наук
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

В статье на основе использования различных статистических параметров проведен детальный анализ временной структуры температурного режима на восточной половине европейской территории России. Выявлены пространственно-временные особенности сравнительных оценок в изменении климатических показателей температуры воздуха в различных регионах и за различные промежутки времени.

Ключевые слова: средняя месячная температура воздуха, европейская территория России, январь, нормы, климатические изменения, потепление.

COMPARATIVE EVALUATION OF CHANGES IN THE CLIMATE INDICATORS OF AIR TEMPERATURE IN THE EUROPEAN TERRITORY OF RUSSIA DURING THE COLD PERIOD OF THE YEAR

*T.N. ZADOROZHNYAYA, Candidate of Geographical Sciences, Assistant Professor
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)
V.P. ZAKUSILOV, Candidate of Geographical Sciences, Assistant Professor
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)
D.V. BUCHNEV, Candidate of Technical Sciences
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

The article based on the use of various statistical parameters conducted a detailed analysis of the temperature regime temporal structure in the eastern half of the Russia European territory. Space-time features of comparative assessments of changes in climatic parameters of air temperature in various regions and for different periods of time are revealed.

Keywords: average monthly air temperature, European territory of Russia, January, norms, climate change, warming.

Введение. Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) в качестве важнейшей международной проблемы XXI века выдвинута задача всестороннего изучения и прогноза глобальных и региональных колебаний погодных условий. Стихийные бедствия, катастрофы, связанные с глобальным изменением климата, ставят под угрозу государственную и общественную безопасность страны. Их влияние на природные и хозяйственные системы становится все более заметным. Поэтому исследования в области климата и его изменений являются одной из приоритетных задач государственной политики России [1].

Климатическая проблема находится на повестке дня международных конференций. Важным событием современности явилась 21-я Международная конференция ООН по климату, ко-



торая проходила в Париже в конце 2015 года [2]. Выступая на пленарном заседании, Президент России Владимир Путин отметил, что «... изменение климата стало одним из самых серьезных вызовов, с которыми сталкивается человечество в XXI столетии». В связи с быстро меняющимся климатом увеличивается потребность в достоверной информации о его аномалиях и изменениях. В связи с этим в России постоянно публикуются ежегодные доклады об особенностях климата различных территорий. Вырабатываются адаптационные рекомендации, которые должны основываться на результатах объективных научных исследований, детальной и взвешенной информации, полученной с помощью как государственной, так и международной сети наблюдений.

Актуальность. Комплексным показателем состояния климата является температура воздуха, которая существенно отражается на всех аспектах человеческой деятельности, в том числе на деятельности авиации. От нее зависят аэродинамические характеристики летательных аппаратов, состояние взлетно-посадочных полос, наземных сооружений и работа аэродромных служб. Поэтому для успешного планирования и выполнения задач учебно-летной и боевой подготовки, с учетом безопасности полетов, на всех этапах выполнения работы требуются знания как о текущей, так и об ожидаемой метеобстановке, в частности, о температуре воздуха.

В связи с этим разработка новых и совершенствование имеющихся методов прогноза температуры воздуха с различной заблаговременностью является актуальной задачей. Вместе с тем, климатические прогнозы погоды являются достаточно сложной в научном плане и трудоемкой в техническом отношении проблемой. Главной сложностью является то, что при разработке прогнозов большой заблаговременности необходимо учитывать «внешние притоки тепла» [3], влияние которых недостаточно изучено. Для их исследования необходимо иметь большие временные ряды параметров атмосферы на различных ее уровнях, которые в настоящее время, в большинстве случаев, являются статистически незначимыми.

В этом случае наиболее приемлемой информацией для прогноза метеоэлементов на длительные сроки являются климатические показатели температуры воздуха, полученные путем обработки временных рядов и изучения их внутренней структуры. Важнейшей составляющей для понимания современного глобального климата является исследование региональных изменений температуры воздуха.

Целью данного исследования является детальный анализ пространственно-временной структуры температурного режима на восточной половине европейской территории России в холодное время года, на примере данных января, за период с 1958 по 2014 годы, и получение сравнительных оценок в изменении его климатических показателей за различные временные интервалы.

Объектом исследования является температурный режим на европейской территории России в холодное время года в приземном слое атмосферы.

Предметом исследования является сравнительная оценка изменений климатических показателей температурного режима, полученных с использованием временных рядов, взятых за различные периоды и масштабы осреднения.

Как правило, в практической деятельности, при перспективном планировании, используются «климатические нормы». Они характеризуют закономерности термического режима, обусловленного географическим расположением исследуемого региона, близостью его к крупным водным объектам, наличием лесных массивов, орографией и другими местными особенностями. В настоящее время, в качестве базовой климатической нормы, установленной Всемирной метеорологической организацией, принят 30-ти летний период с 1961 по 1990 годы [4]. По нему производится планирование всех видов деятельности, в том числе и государственная политика. По отношению к нему производится сравнение текущего режима погоды и делается вывод о наблюдаемых колебаниях климата. В то же время, как показывают многочисленные исследования, в частности, данные Оценочных докладов «ОД-РФ-1, 2008» [5] и «ОД-РФ-2, 2014» [6], выполненных под руководством Росгидромета и международных организаций по проблемам кли-



мата, в последнее время климатические изменения происходят довольно быстро. Поэтому базовые климатические нормы температуры, используемые для климатических прогнозов, могут быть неприемлемыми. В целях уточнения климатических норм приходится проводить постоянный их мониторинг, чтобы вовремя определить направление и знак возможных отклонений в наметившейся тенденции климата.

Климатические нормы очень неоднородны по территории, так как кроме крупномасштабных процессов, обуславливающих формирование температуры воздуха, на них существенное влияние оказывают местные особенности. Поэтому важную роль играют детальные региональные исследования, тем более что в настоящее время имеется реальная возможность в получении новых метеорологических данных, в том числе о температуре воздуха, из базы реанализа [7]. Именно исследованию региональных особенностей пространственно-временного распределения температуры воздуха на ограниченной территории Европы посвящена данная работа.

Постановка задачи и описание исходных данных. Вопросам регионального исследования температуры воздуха во всем мире уделяется много внимания, однако получаемые выводы во многом различаются, так как каждый из авторов при решении данной задачи использует различные подходы (методы статистической обработки, длину ряда, различные параметры температуры). Как правило, выводы о климатических изменениях температуры делаются на основании данных, представленных в отклонениях от базовых норм, и со значительным осреднением по времени и пространству [5, 6]. Учитывая тот факт, что в настоящее время имеет место увеличение скорости климатических изменений, соответственно меняются и климатические «нормы», поэтому использование такого подхода может быть неэффективным. В данной работе исследование проведено на базе фактических данных о температуре воздуха. Кроме того, учитывая неоднородность подстилающей поверхности на различных участках рассматриваемой территории, в качестве информации о температуре воздуха, для выявления закономерностей, в отличие от упомянутых выше работ, использовались данные не у поверхности земли, а на уровне 1000 гПа. Это в некоторой степени уменьшает влияние подстилающей поверхности.

Для решения поставленной задачи в данной работе использованы среднемесячные значения температуры воздуха января в узлах стандартной сетки с шагом $2,5 \times 2,5^\circ$ на территории, ограниченной $30\text{--}60^\circ$ восточной долготы (в.д.) и $40\text{--}60^\circ$ северной широты (с.ш.) на уровне 1000 гПа за период с 1958 по 2014 годы. Информационной базой послужили данные реанализа NCEP/NCAR [8].

Для получения сравнительных оценок климатических изменений исследование проводилось на основании анализа среднемесячной температуры воздуха по трем вариантам выборок f_k :

- в вариант выборки f_1 включались данные о температуре за период с 1958 по 2014 год, охватывающие всю имеющуюся выборку;
- в вариант выборки f_2 включались данные за период с 1979 по 2014 год, характеризующиеся, согласно оценочным докладам Росгидромета [5], повышенным уровнем загрязнения воздушной среды парниковыми газами, влияющими на температурный фон регионов;
- в вариант выборки f_3 включены годы с 1961 по 1990, являющиеся базовой климатической нормой. Он рассматривался в качестве контрольного ряда.

При исследовании ставилась задача: определить насколько значимо может повлиять факт повышенной концентрации парниковых газов на повышение температуры воздуха и однородно ли оно на различных участках исследуемой территории.

Анализ результатов исследования. В целях выявления особенностей пространственно-временного распределения температуры, во временных рядах исследуемых вариантов выборок f_k предварительно производилось сжатие информации. Для этого в каждом узле (i, j) широтно-долготной сетки с шагом $2,5^\circ$ соответствующего варианта выборки f_k рассчитывались средние значения среднемесячных температур воздуха $\bar{T}_{i,j}^{f_k}$, условно названных климатическими сетевыми «нормами» [5]. Они рассчитывались по формуле:



$$\bar{T}_{i,j}^{f_k} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N T_{i,j,t}^{f_k}, \quad (1)$$

где t – порядковый номер года в выборке, f_k – вариант исследуемой выборки, N – количество лет, входящих в исследуемый вариант выборки f_k .

Расчеты проводились для всех вариантов выборок в отдельности. На рисунке 1 представлено распределение сетевых «норм» в узлах регулярной сетки, кратных $2,5^\circ$, на исследуемой территории для базового периода (1961–1990 гг.). Следует напомнить, что именно он в настоящее время используется в качестве практических рекомендаций при планировании различных видов деятельности.

Из анализа рисунка 1 следует, что в январе по усредненным данным базового периода f_3 для всей рассматриваемой территории, кроме крайнего юго-запада, наблюдается преимущественно отрицательный режим температуры. При этом средняя многолетняя температура воздуха на всех широтах монотонно понижается с запада на восток, отражая убывание тепляющего влияния акватории Северной Атлантики на данную территорию.

В соответствии с пространственным распределением радиационного баланса, в данном месяце самые низкие температуры отмечаются в высоких широтах (60 – 55° с.ш.) рассматриваемой территории. Средняя месячная температура воздуха $\bar{T}_{i,j}^{f_3}$ на широте 60° с.ш. понижается от $-8,59^\circ\text{C}$ на западе до $-16,1^\circ\text{C}$ на востоке. Контраст температур между западными и восточными долготами составляет $7,5^\circ$, а скорость ее изменения вдоль широты находится в пределах $0,5$ – $0,8^\circ\text{C}/2,5^\circ$ в.д. При смещении к югу температура воздуха на всех широтах повышается, оставаясь отрицательной до широты 45° с.ш., а контраст температуры между востоком и западом сохраняется практически постоянным. На крайних южных широтах (45 – 40° с.ш.), преимущественно в юго-западных районах, температура приобретает положительные значения. Исключение на данных широтах составляют долготы 55 – 60° в.д., где температура воздуха $\bar{T}_{i,j}^{f_3}$ сохраняет отрицательный знак, но абсолютные ее значения невелики. На большей части сетевых узлов (i, j) широты 40° с.ш. средняя месячная температура $\bar{T}_{i,j}^{f_3}$ в январе превышает 5°C . Положительными значениями температуры охвачено 21% рассматриваемой территории.

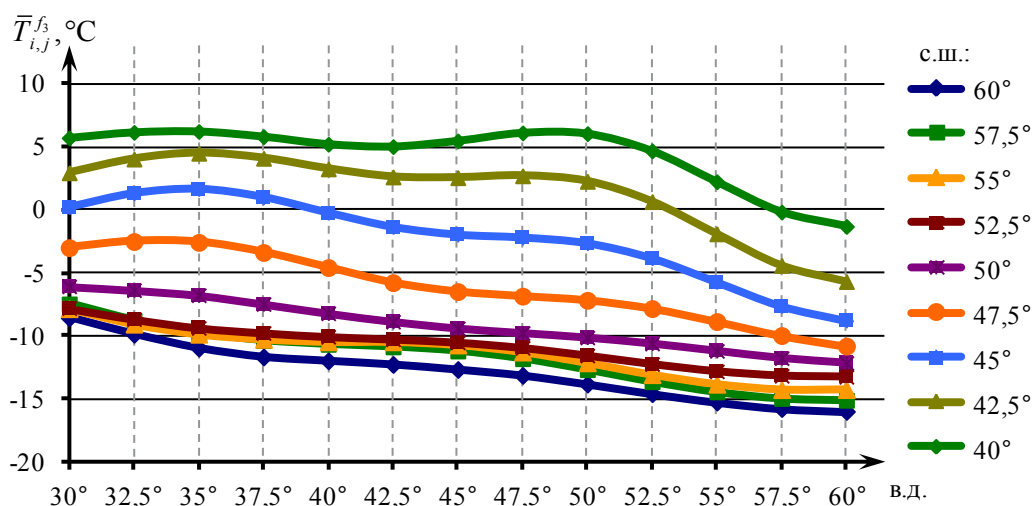


Рисунок 1 – Распределение сетевых «норм» температуры воздуха в январе $\bar{T}_{i,j}^{f_3}$ (1961–1990 гг.) по широтной зоне 40 – 60° с.ш. в секторе 30 – 60° в.д.



Если вдоль широт изменение температуры воздуха от долготы к долготе происходит практически равномерно и незначительно, то изменение температуры воздуха вдоль долготы, от широты к широте меняется существенно.

Среднее изменение температуры $\delta \bar{T}_{i,j}^{f_k}$ вдоль фиксированной долготы j на рассматриваемой территории рассчитывалось как разность сетевых температур $\bar{T}_{i,j}^{f_k}$, находящихся на южнее ($i+1$) и севернее (i) расположенных широтах, по формуле:

$$\delta \bar{T}_{i,j}^{f_k} = \bar{T}_{i+1,j}^{f_k} - \bar{T}_{i,j}^{f_k}, \quad (2)$$

где j – фиксированная долгота, i – исследуемая широта, $i+1$ – широта, находящаяся на $2,5^\circ$ южнее исследуемой.

Распределение величин $\delta \bar{T}_{i,j}^{f_3}$ для варианта выборки f_3 на различных широтах представлено на рисунке 2. Из рисунка видно, что минимальные изменения сетевых норм температуры вдоль фиксированных долгот отмечаются в высоких широтах ($60-52,5^\circ$ с.ш.). Здесь повышение температуры воздуха с севера на юг происходит со скоростью $\delta \bar{T}_{i,j}^{f_3} = 0,5-1,0^\circ\text{C}/2,5^\circ$ с.ш., но, начиная с широты 50° с.ш., величина изменения температуры возрастает до $2,0^\circ\text{C}$, а на долготе 35° с.ш. – до $2,5^\circ\text{C}/2,5^\circ$ с.ш. На южных широтах разность температур на $2,5^\circ$ с.ш. достигает $4-5^\circ\text{C}/2,5^\circ$ с.ш. Однако величина их экстремумов колеблется от $4,2^\circ\text{C}$ на долготе 35° в.д. ($50-47,5^\circ$ с.ш.) до $5,0^\circ\text{C}$ на долготе 50° в.д. (широты $45-42,5^\circ$ в.д.).

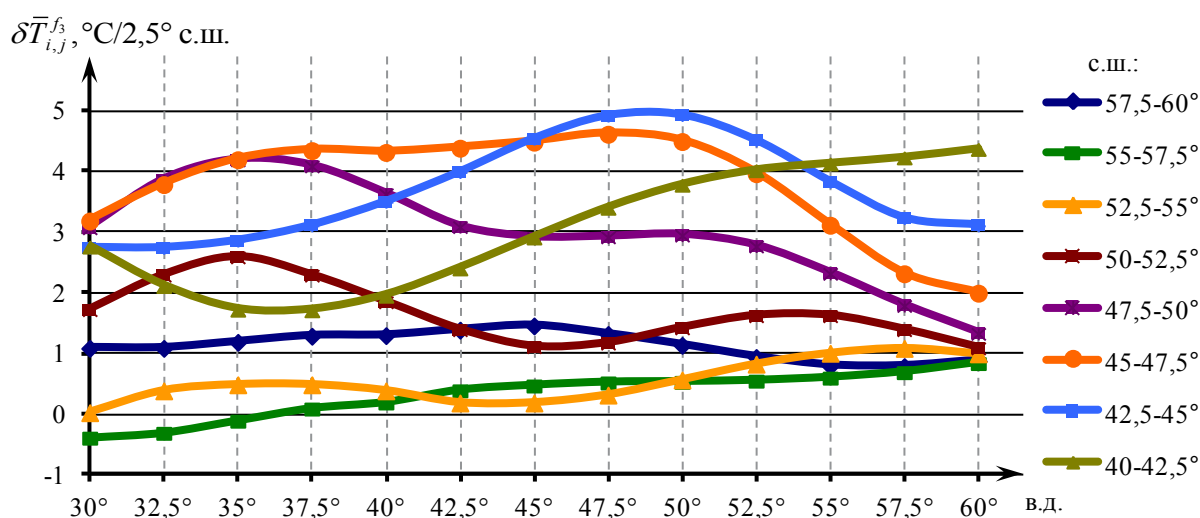


Рисунок 2 – Распределение изменений сетевых «норм» температуры воздуха вдоль фиксированных долгот j в январе $\delta \bar{T}_{i,j}^{f_3}$ (1961–1990 гг.)

Описанное выше распределение температуры воздуха по рассматриваемой территории было характерно для базового периода. В дальнейшем проводился сравнительный анализ различных параметров температуры базового периода с данными, полученными по другим вариантам описанных выше выборок, и, в частности, с периодом последних нескольких десятилетий (1979–2014 гг.).

На рисунке 3 представлены разности сетевых «норм» температуры воздуха между базовым периодом f_3 и периодом f_2 1979–2014 годов, которые характеризовались повышенной концентрацией парниковых газов.

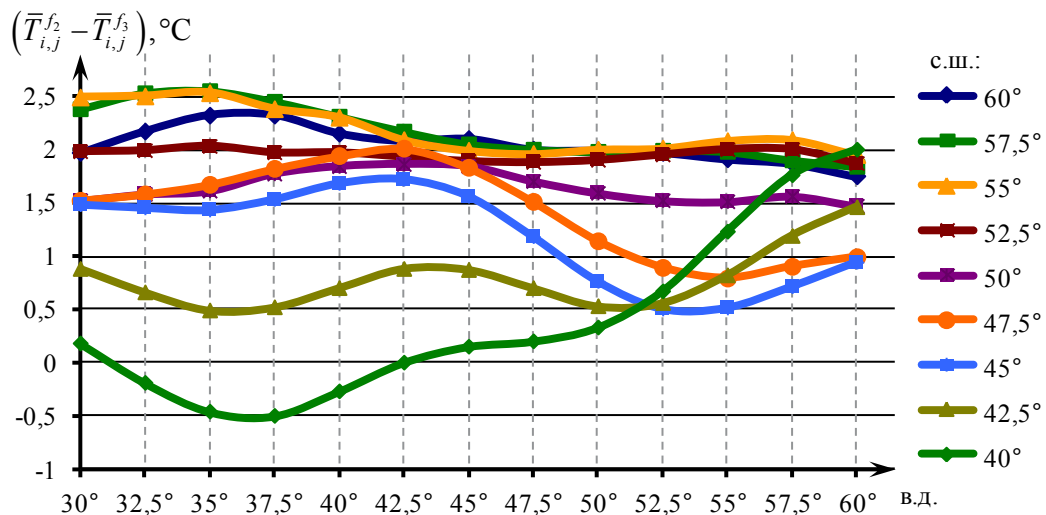


Рисунок 3 – Межпериодные разности сетевых «норм» температуры воздуха в январе ($\bar{T}_{i,j}^{f_2} - \bar{T}_{i,j}^{f_3}$) (между периодами 1979–2014 и 1961–1990 гг.)

Анализ межпериодных разностей ($\bar{T}_{i,j}^{f_2} - \bar{T}_{i,j}^{f_3}$) средних многолетних значений температуры воздуха в узлах регулярной сети точек (i, j), представленный на рисунке 3, показал, что в течение последних десятилетий на рассматриваемой территории, по данным января, произошли существенные изменения. Так, температура воздуха в течение данного периода в основном повышалась. Однако, распределение величины повышения температуры воздуха по территории имеет неравномерный характер. Величина происшедшего изменения температуры связана как с широтой, так и долготой места. В западных районах рассматриваемой территории повышение температуры воздуха изменялось от $(\bar{T}_{i,j}^{f_2} - \bar{T}_{i,j}^{f_3}) = -0,5^\circ\text{C}$, на южных широтах, – до $2,5^\circ\text{C}$ – на северных. В восточных районах – контраст повышения температуры между северными и южными широтами составил $1-2^\circ\text{C}$.

Наибольшие изменения температуры за рассматриваемый период наблюдались в северных районах, в диапазоне широт $55-60^\circ$ с.ш., где температура воздуха повышалась на величину $(\bar{T}_{i,j}^{f_2} - \bar{T}_{i,j}^{f_3}) =$ от $2,0$ до $2,5^\circ\text{C}$. При этом, вдоль широты изменений почти не происходило. Начиная с широты $52,5^\circ$ с.ш., разность температур между рассматриваемыми периодами уменьшалась, но существенно изменялась вдоль фиксированной широты. Этот факт особенно характерен для широт $45-47,5^\circ$ с.ш. В узлах регулярной сетки на этих широтах максимальное повышение температуры произошло на долготе $42,5^\circ$ в.д. и составило $1,5-2,0^\circ\text{C}$, минимальное – на долготе 50° в.д. Здесь повышение температуры за истекший период не превысило $0,5^\circ\text{C}$.

Характерные особенности в распределении межпериодных изменений температуры воздуха ($\bar{T}_{i,j}^{f_2} - \bar{T}_{i,j}^{f_3}$) отмечены на широте 40° с.ш. Следует заметить, что это единственная широта, на которой температура воздуха на долготах от $32,5^\circ$ до $42,5^\circ$ в.д. в течение последних десятилетий повышения температуры не происходило, а наблюдалось даже понижение температуры $(\bar{T}_{i,j}^{f_2} - \bar{T}_{i,j}^{f_3}) = -0,5^\circ\text{C}$. Однако, к востоку от $42,5^\circ$ в.д. на этой широте наблюдается постепенное ее повышение и уже узлах, находящихся вблизи Уральских гор, разность $(\bar{T}_{i,j}^{f_2} - \bar{T}_{i,j}^{f_3})$ составила 2°C .

Таким образом, анализ январских температур, представленных сетевыми «нормами», подтвердил наличие индивидуального повышения температуры воздуха в различных точках (i, j) на рассматриваемой территории. В связи с этим в практической деятельности, при планировании различных мероприятий, зависящих от температурного режима, рекомендуется вводить регио-



нальные поправки на величину $(\bar{T}_{i,j}^{f_2} - \bar{T}_{i,j}^{f_3})$, с учетом ее пространственного распределения, представленного на рисунке 3.

Так как климатические параметры температуры воздуха довольно многообразны, поэтому в данной работе исследовались и другие характеристики температуры, способные с различных сторон, описать наблюдающиеся в настоящее время климатические изменения.

Так, в качестве параметра температуры воздуха в каждом варианте выборки f_k , использована усредненная по рассматриваемой территории величина, рассчитанная по формуле:

$$\tilde{T}^{f_k} = \frac{1}{m} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \bar{T}_{i,j}^{f_k}, \quad (3)$$

где f_k – вариант выборки, m – количество узлов регулярной сетки вдоль широты, n – количество узлов регулярной сетки вдоль долготы.

Сглаженные по исследуемому сектору нормы среднемесячных температур воздуха за различные промежутки времени позволяют установить временные закономерности в изменении климата и исключить несущественные детали процесса. Результаты расчетов представлены на рисунке 4.

Исходя из анализа рисунка 4, можно сделать вывод, что в январе самые низкие среднемесячные температуры \tilde{T}^{f_k} по сектору 30–60° в.д. отмечались в базовом периоде с 1961 по 1990 годы. Среднее по территории значение среднемесячной температуры воздуха в данном периоде составило $\tilde{T}^{f_3} = -7,14^\circ\text{C}$. В то же время, анализ средних месячных значений температуры \tilde{T}^{f_2} , полученных по выборке более позднего периода (1979–2014 годов), показал, что в течение этого периода средняя температура воздуха, осредненная по исследуемой территории, значительно выросла. Ее величина составила $\tilde{T}^{f_2} = -4,97^\circ\text{C}$, что на $2,17^\circ\text{C}$ выше, чем в базовом периоде. Таким образом, скорость повышения температуры составила $0,52^\circ\text{C}/10$ лет.

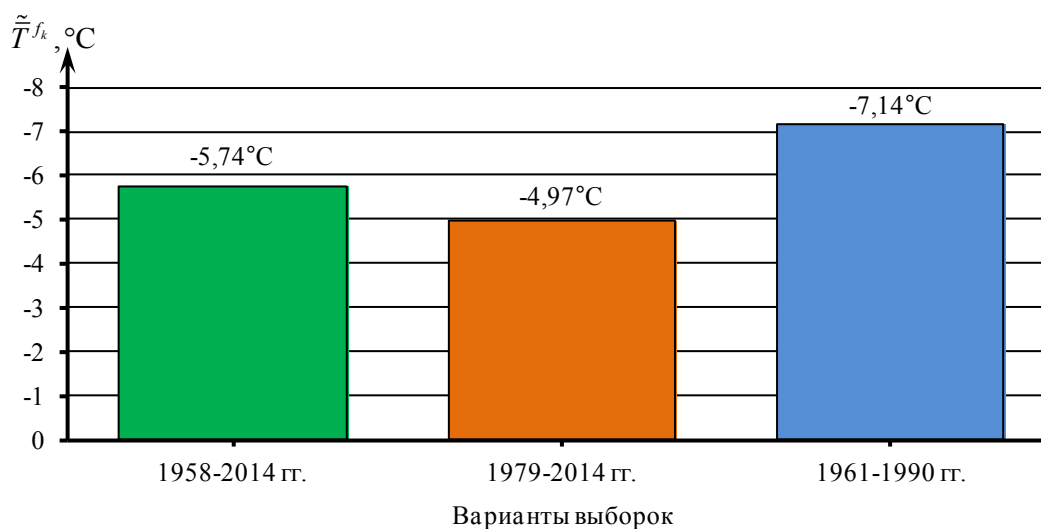


Рисунок 4 – Усредненная среднемесячная температура воздуха в январе \tilde{T}^{f_k} для различных вариантов выборок f_k

Средние многолетние значения температуры воздуха, полученные по всей выборке (вариант выборки f_1), составили $-5,74^\circ\text{C}$, то есть оказался промежуточной величиной. В данный вариант выборки были включены данные, как за более ранний период, так и за поздний период. Хотя более ранний, по отношению к базовому, период не большой, но, как оказалось, он внес



заметный вклад в общий фон температурного режима при определении климатических норм. Этот факт может являться подтверждением наличия положительной тенденции в многолетнем ходе температуры. Поэтому при современном использовании климатических данных в качестве прогностических рекомендаций по планированию различных мероприятий, зависящих от температурного режима, требуется введение соответствующей поправки на повышение температуры, согласно приведенной выше величине скорости повышения температуры, которая составила $0,52^{\circ}\text{C}/10$ лет.

Следует напомнить, что данные выводы о выявленных региональных изменениях температуры, были получены на основании средних месячных значений температуры, усредненных по всей рассматриваемой территории. При подготовке отчетов МГЭИК были разработаны рекомендации по исследованию изменения климата путем использования некоторого набора индексов экстремальности [9]. Среди показателей, получивших распространение при анализе изменений климата в России, в данном исследовании рассмотрены индексы средних многолетних экстремумов, наблюдавшихся в отдельных периодах. Для этого во всех вариантах выборок рассчитывались средние максимальные и средние минимальные значения температуры по формулам:

$$\tilde{T}_{\max}^{f_k} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N T_{\max t}^{f_k}, \quad \tilde{T}_{\min}^{f_k} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N T_{\min t}^{f_k}, \quad (4)$$

где $T_{\max t}^{f_k} = \max(T_{i,j,t}^{f_k})$, $T_{\min t}^{f_k} = \min(T_{i,j,t}^{f_k})$ – соответственно максимальная и минимальная по рассматриваемой территории среднемесячная температура января в год t , входящая в выборку f_k .

На рисунке 5 для каждого из рассматриваемых вариантов выборок f_k , представлены средние по территории, максимальные значения температуры $\tilde{T}_{\max}^{f_k}$.

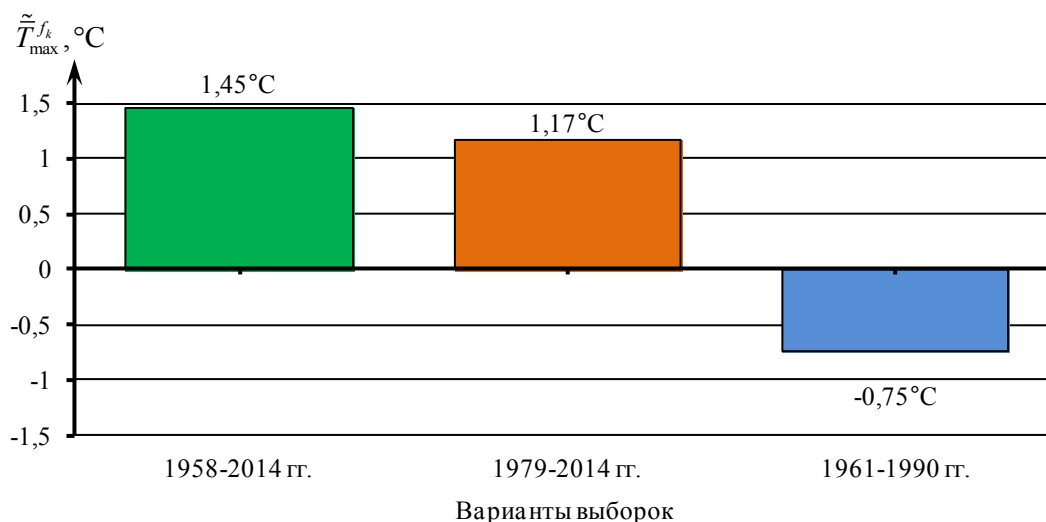


Рисунок 5 – Средняя максимальная температура в январе $\tilde{T}_{\max}^{f_k}$ для различных вариантов выборок f_k

Из рисунка видно, что величина средней максимальной температуры воздуха в январе, по представленным вариантам выборок, различается существенно, не только по величине, но и по знаку. Самые низкие значения максимальной температуры $\tilde{T}_{\max}^{f_3}$ наблюдались в базовом периоде, в котором средняя максимальная температура января имеет отрицательный знак, а ее величина близка к $1,0^{\circ}\text{C}$ ($\tilde{T}_{\max}^{f_3} = -0,75^{\circ}\text{C}$). Для остальных используемых выборок максимальная темпера-



тура положительная. По данным средних по полю максимальных значений температуры за три последних десятилетия значительно повысились, скорость повышения максимальной температуры $\tilde{T}_{\max}^{f_k}$ составила $0,67^{\circ}\text{C}/10$ лет.

На рисунке 6 представлено распределение вариантам выборок средних минимальных температур воздуха $\tilde{T}_{\min}^{f_k}$.

Из рисунка наглядно видно, что во всех выборках средняя минимальная температура воздуха является отрицательной. Самая низкая средняя минимальная температура воздуха наблюдалась во временном ряде, в который включена вся исследуемая выборка f_1 , ($\tilde{T}_{\min}^{f_1} = -15,11^{\circ}\text{C}$). В базовом периоде (1961–1990 годы) средняя минимальная температура несколько повысилась ($\tilde{T}_{\min}^{f_3} = -14,71^{\circ}\text{C}$), но наиболее значительное повышение средних минимальных температур произошло за период с 1979 по 2014 годы, в котором минимальная температура воздуха $\tilde{T}_{\max}^{f_2}$ достигла $-12,76^{\circ}\text{C}$. Скорость повышения средней минимальной температуры за последние десятилетия, составила $0,53^{\circ}\text{C}/10$ лет.

Таким образом, анализ результатов средних максимальных и минимальных температур показал, что в течение последних десятилетий произошло повышение не только средних многолетних температур воздуха $\tilde{T}_{i,j}^{f_k}$, но и средних максимальных $\tilde{T}_{\max}^{f_k}$ и минимальных температур $\tilde{T}_{\min}^{f_k}$, при этом скорость повышения максимальных температур происходит несколько быстрее минимальных.

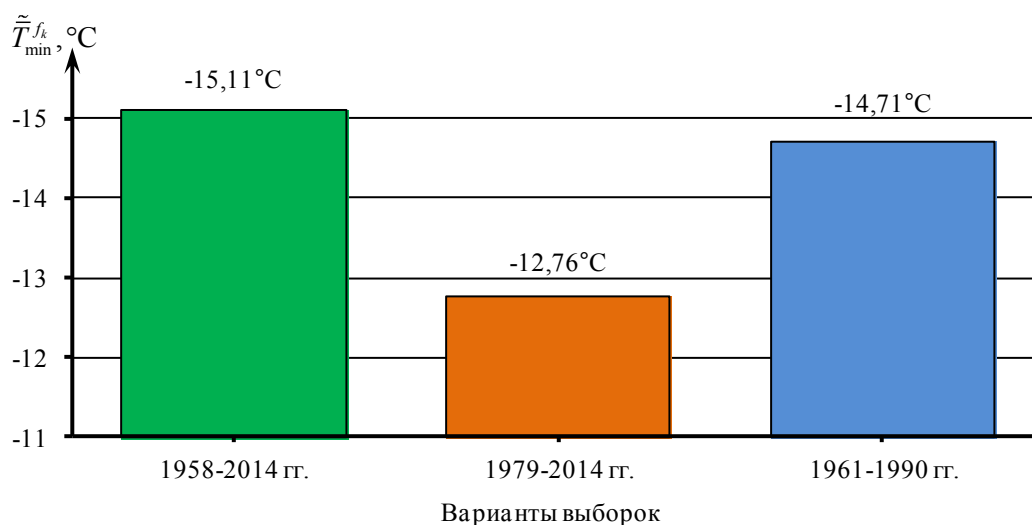


Рисунок 6 – Средняя минимальная температура в январе $\tilde{T}_{\min}^{f_k}$ для различных вариантов выборок f_k

В дальнейшем, в данной работе проведены детальные исследования по выявлению особенностей пространственного распределения температуры воздуха, осредненной в широтном и долготном направлениях, в различных вариантах выборок f_k . С этой целью, для каждого варианта выборки f_k , по данным сетевых «норм» температуры $\tilde{T}_{i,j}^{f_k}$, производился расчет средней долготной температуры воздуха, осредненной вдоль фиксированных долгот, по формуле:

$$\tilde{T}_j^{f_k} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \tilde{T}_{i,j}^{f_k}, \quad (5)$$



где j – фиксированная долгота, кратная $2,5^\circ$ ($j=30, 32,5, \dots, 60^\circ$ в.д.), m – количество широт, кратных $2,5^\circ$, расположенных вдоль долготы j .

Результаты расчета осредненных по долготам, значений сеточных «норм» среднемесячной температуры воздуха $\tilde{T}_j^{f_k}$, в различных вариантах выборок f_k , представлены на рисунке 7.

Из рисунка видно, что сеточные «нормы» средней месячной температуры воздуха, осредненные вдоль исследуемых долгот j , во всех выборках, максимальное значение приобретают в западных районах рассматриваемой территории. Величина $\tilde{T}_j^{f_k}$ изменяется в пределах от -2°C для выборки f_2 до -4°C для выборки f_3 . Для долгот, расположенных к востоку, величина «норм» средних месячных температур воздуха монотонно понижается, принимая минимальные значения на долготе 60° в.д. На этой долготе температура $\tilde{T}_j^{f_k}$ между исследуемыми вариантами больше и составляет $2,4^\circ\text{C}$. Обращает на себя внимание тот факт, что характер кривых, описывающих распределение норм вдоль долготы, для всех вариантов выборок f_k , практически одинаков. При этом на всех долготах самые низкие температуры отмечаются для выборки базового периода f_3 (1961–1990 гг.). По отношению к нему, температура воздуха в последние десятилетия (выборка f_2), существенно выросла, хотя и сохраняется на всех долготах отрицательной. Разность температур между рассматриваемыми выборками находится в пределах от 2°C на западной границе рассматриваемого сектора, и почти до 3°C , на крайнем востоке. Таким образом, среднемесячная температура воздуха растет, но наиболее быстро это происходит вблизи Уральских гор, где скорость повышения температуры, в среднем, составляет около $1^\circ\text{C}/10$ лет.

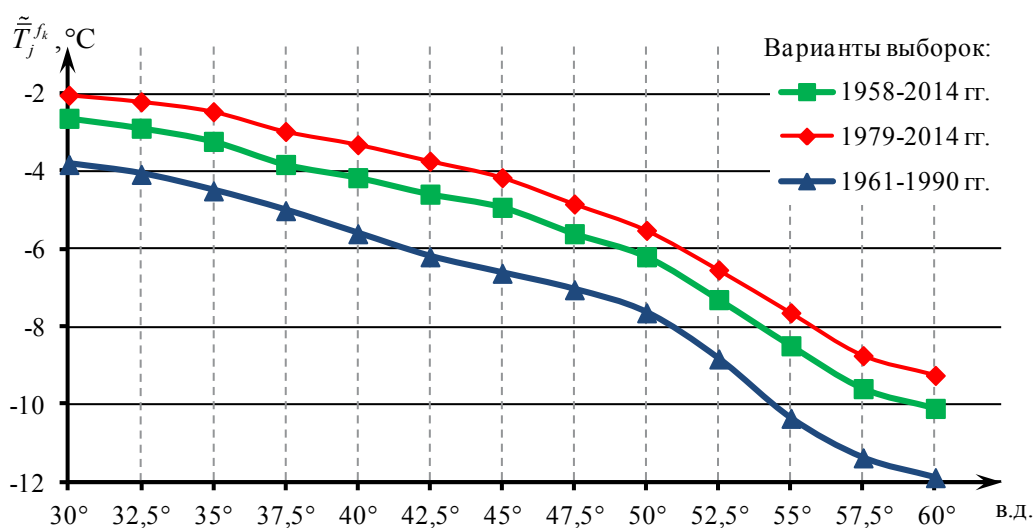


Рисунок 7 – Распределение сетевых «норм» среднемесячных температур воздуха в январе $\tilde{T}_j^{f_k}$, осредненных вдоль каждой рассмотренной долготы для различных выборок f_k

Для сравнения, на рисунке 8 представлено распределение сеточных «норм» средней месячной температуры $\tilde{T}_i^{f_k}$, осредненной по значениям температуры расположенных вдоль фиксированных широт:

$$\tilde{T}_i^{f_k} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{T}_{i,j}^{f_k}, \quad (6)$$

где i – фиксированная широта, кратная $2,5^\circ$ ($i=40, 42,5, \dots, 60^\circ$ с.ш.), n – количество широт, кратных $2,5^\circ$, расположенных вдоль долготы i .



Распределение рассчитанных сетевых «норм» $\bar{T}_i^{f_k}$, осредненных вдоль различных широт i , представлено на рисунке 8.

Из рисунка наглядно видно, что на всех широтных зонах, самые низкие значения сетевых «норм» $\bar{T}_i^{f_k}$ среднемесячной температуры воздуха в январе отмечаются в базовом периоде (выборка f_3). Особенно четко это проявилось на широте 45° с.ш., где разность между выборкой f_3 и выборкой f_2 составляет около 6°C , то есть скорость повышения температуры достигает почти $2^\circ\text{C}/10\text{лет}$. На широтах $40-42,5^\circ$ с.ш. температуры воздуха положительные и на них температуры воздуха в базовом периоде также оказываются более низкими. Однако величина разности средних месячных температур между базовым периодом и периодом последних десятилетий намного меньше. На этих широтах, хотя температура воздуха за последние десятилетия и повышалась, но скорость повышения, в среднем, составила $0,3^\circ\text{C}/10\text{ лет}$, что намного меньше, чем в северных широтах. Проведенный анализ средних месячных температур воздуха, осредненных по долготам и широтам, показал, что в январе на исследуемой территории в течение последних десятилетий происходило повышение температуры, однако оно было неравномерным. Наибольшее повышение температуры происходило в северных широтах и восточных долготах.

Рассчитанные сеточные «нормы» последних десятилетий (выборка f_2) могут быть использованы в качестве прогностических рекомендаций. Оценкой доверия к рассчитанным нормам, в том числе для варианта выборки последних десятилетий f_2 (1979-2014 гг.), как к прогностическим рекомендациям, является среднеквадратическое отклонение (СКО), рассчитываемое как для средней многолетней температуры в конкретных узлах $\sigma_{i,j}^{\bar{T}^{f_k}}$, так и для температуры, осредненной по долготам $\sigma_j^{\bar{T}^{f_k}}$ и по широтам $\sigma_i^{\bar{T}^{f_k}}$ соответственно по формулам [10]:

$$\sigma_{i,j}^{\bar{T}^{f_k}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (T_{i,j,t}^{f_k} - \bar{T}_{i,j}^{f_k})^2}, \quad \sigma_j^{\bar{T}^{f_k}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m T_{i,j,t}^{f_k} - \bar{T}_j^{f_k} \right)^2}, \quad \sigma_i^{\bar{T}^{f_k}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n T_{i,j,t}^{f_k} - \bar{T}_i^{f_k} \right)^2}. \quad (7)$$

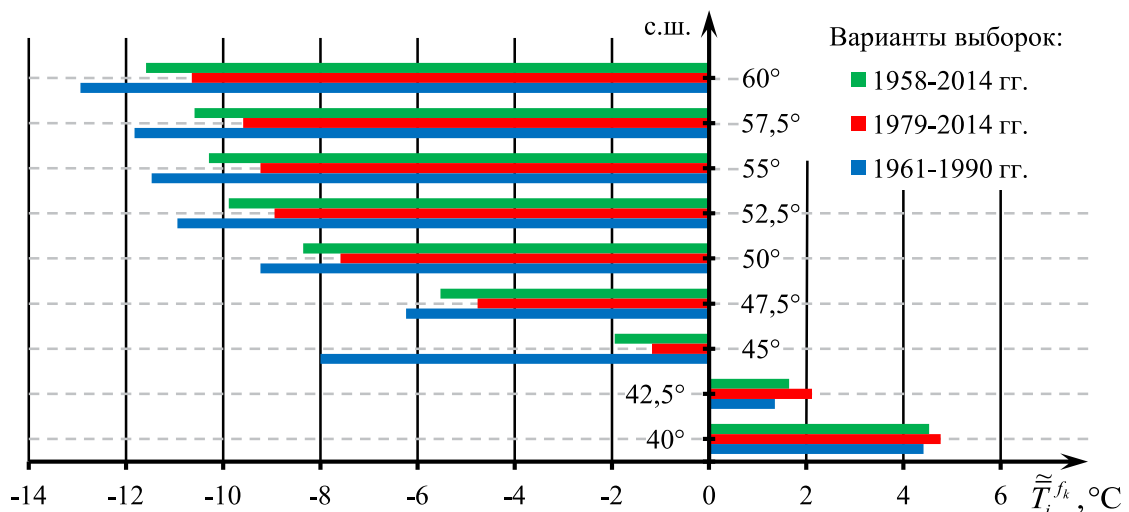


Рисунок 8 – Распределение сетевых «норм» среднемесячных значений температуры воздуха в январе $\bar{T}_i^{f_k}$, осредненных вдоль фиксированных широт для различных выборок f_k

СКО показывает, в каких средних пределах может изменяться исследуемая температура в рассматриваемой выборке. Чем больше СКО, тем меньше доверия к рассматриваемой величине.



Межгодовая изменчивость, характеризующаяся СКО сетевых «норм» среднемесячной температуры воздуха, осредненной вдоль долгот и широт представлена на рисунках 9–10.

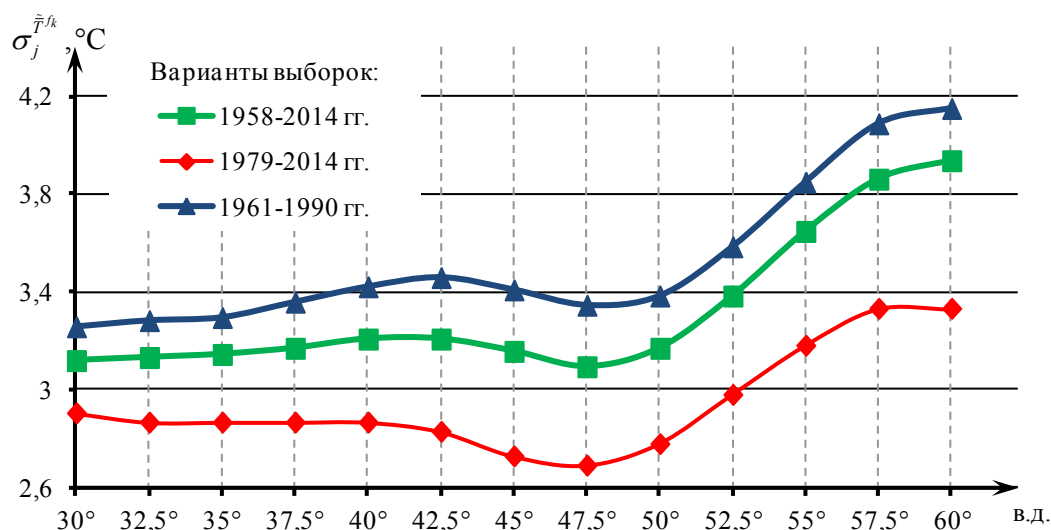


Рисунок 9 – Межгодовые колебания сетевых «норм» среднемесячной температуры воздуха в январе, осредненных по долготам, для различных выборок f_k

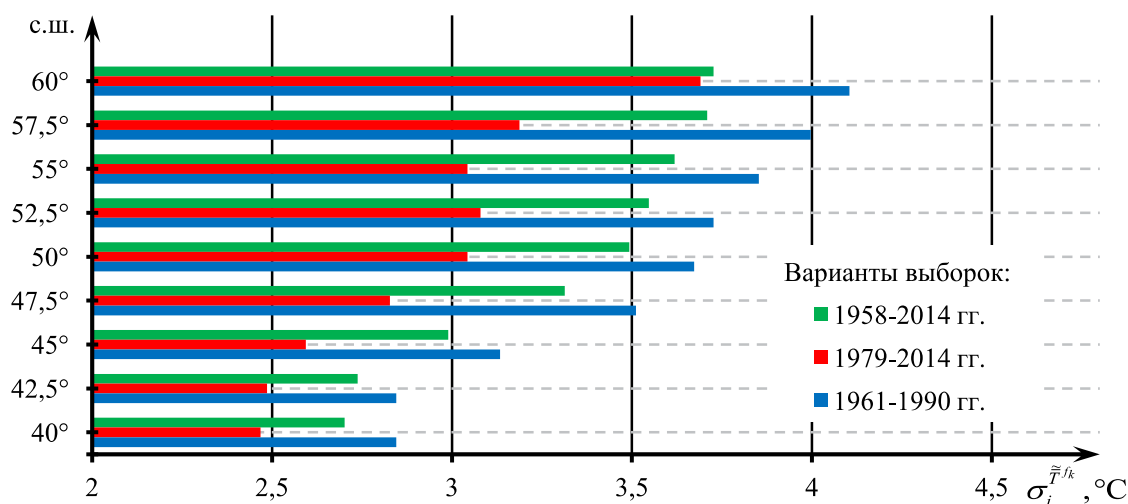


Рисунок 10 – Межгодовые колебания сетевых «норм» среднемесячной температуры воздуха в январе, осредненных вдоль широт, для различных выборок f_k

На рисунке 9 представлено распределение межгодовых изменений сетевых «норм» по долготам, которые также указывают на то, что самые низкие значения СКО также связаны с периодом последних десятилетий. Наибольшие различия в изменчивости по выборкам наблюдаются в крайних восточных районах рассматриваемого сектора, где они могут достигать 4,2°C.

Из рисунка 10 видно, что максимальное межгодовое колебание температуры воздуха по широтам наблюдается в северных районах рассматриваемого сектора и составляет 4,1°C, при этом связана она с данными, рассчитанными по базовой выборке f_3 , то есть средняя ошибка климатического прогноза составляет 4,1°C. При перемещении к южным широтам, величина СКО уменьшается, принимая минимальные значения на широте 40° с.ш., где она составляет 2,8°C. Для других выборок кривые СКО повторяют конфигурацию, которая была характерна



для периода 1961–1990 годов, однако величина их значительно меньше, особенно для выборки последних десятилетий 1979–2014 гг.

Проведенный анализ свидетельствует о том, что в периоде f_2 происходит уменьшение межгодовой изменчивости, а, следовательно, успешность климатического прогноза, рассчитанного по данным выборки за период с 1979 по 2014 годы, будет значительно выше по сравнению с прогностическими рекомендациями, основанными на данных базового периода 1961–1990 гг.

Выводы. На основании проведенного исследования, по изучению пространственно-временных особенностей температурных рядов на европейской территории России в холодный период года, за различные промежутки времени, получены следующие результаты:

- по различным параметрам температуры воздуха (средним по территории, сетевым «нормам», среднедолготным и среднеширотным значениям) получены сравнительные оценки между данными базового периода (1961–1990 гг.) и периодом последних десятилетий (1979–2014 гг.), подтвердившие факт повышения температуры воздуха, отмеченный в Оценочных докладах Росгидромета, на основе анализа температуры воздуха по всей Российской Федерации;

- установлено, что скорость повышения средних многолетних температур воздуха в среднем по исследуемому региону составляет $0,52^{\circ}\text{C}/10$ лет. По данным средних минимальных и максимальных температур также происходит повышение, однако величина максимальных температур растет быстрее ($0,67^{\circ}\text{C}/10$ лет), чем минимальных ($0,53^{\circ}\text{C}/10$ лет). Полученные в работе оценки повышения температур оказались намного выше, чем те, которые, в общем, были получены ранее, по всей России и в Европе в частности в работе [6] ($0,33^{\circ}\text{C}/10$ лет);

- детальный анализ температуры воздуха в узлах регулярной сетки, позволил уточнить скорость повышения температуры в различных регионах рассматриваемой территории. Максимальные скорости потепления отмечены в северных районах, на широтах $60\text{--}55^{\circ}$ с.ш., на которых в секторе долгот $32,5\text{--}37,5^{\circ}$ с.ш. скорости повышения температуры достигают $1,0^{\circ}\text{C}/10$ лет. Установлено также, что в южных районах, на широте 40° с.ш. температура воздуха в периоде последних десятилетий даже понижалась;

- приведенные оценки скорости повышения температуры рекомендуется учитывать при перспективном планировании различных мероприятий в данном районе, в холодный период года, учитывая индивидуальное распределение оценочных данных по скорости изменения температуры воздуха, на приведенных в работе рисунках 3–8, а также следует учитывать успешность сетевых «норм», приведенных на рисунках 9–10.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Климатическая доктрина РФ. Постановление правительства РФ от 17 декабря 2009 г. № 851-пп. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gistatgroup.com> (дата обращения 21.12.2018).

2. 21-я Международная конференция ООН по климату 30 ноября – 12 декабря 2015 г. в Париже. Изменение климата. [Электронный ресурс] // Информационный бюллетень № 58. С. 5–8. Режим доступа: <http://www.meteorf.ru/press/news/10759> (дата обращения 21.12.2018).

3. Мусаелян Ш.А. Проблемы предсказуемости состояния атмосферы и гидродинамический долгосрочный прогноз погоды. М.: Гидрометеиздат, 1984. 184 с.

4. Лоренц Э.Н. Предсказуемость климата. В книге: Физические основы теории климата и его моделирования // Труды Международной научной конференции, организованной ВМО и МСРС при поддержке программы ООН по окружающей среде. Стокгольм, 29 июля – 10 августа 1974 г. М.: Гидрометеиздат, 1977. С. 137–141.

5. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 1. Изменения климата. М.: Росгидромет, 2008. 227 с.

6. Доклад Росгидромета об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2013 год. М.: Росгидромет, 2014. 246 с.



7. Kistler R. Reanalysis at NCEP: Past, Present and Future [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/workshops/V1-103_ea.pdf. (дата обращения: 21.12.2018).
8. NCEP/NCAR Reanalysis Project. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.esrl.noaa.gov/pcd/data/reanalysis/reanalysis.shtml> (дата обращения: 21.12.2018).
9. Frich et al. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century // *Climate Res.* 2002. Vol. 19. pp. 193–212.
10. Брукс К., Карузертс Н. Приложение статистических методов в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1963. 416 с.

REFERENCES

1. Klimaticheskaya doktrina RF. Postanovlenie pravitel'stva RF ot 17 dekabrya 2009 g. № 851-рп. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gistatgroup.com> (дата обращения: 21.12.2018).
2. 21-ya Mezhdunarodnaya konferenciya OON po klimatu 30 noyabrya - 12 dekabrya 2015 g. v Parizhe. *Izmenenie klimata*. [Электронный ресурс] // *Informacionnyj byulleten' № 58*. pp. 5–8. Режим доступа: <http://www.meteorf.ru/press/news/10759> (дата обращения: 21.12.2018).
3. Musaelyan Sh.A. Problemy predskazuemosti sostoyaniya atmosfery i gidrodinamicheskij dolgosrochnyj prognoz pogody. M.: Gidrometeoizdat, 1984. 184 p.
4. Lorenc E.N. Predskazuemost' klimata. V knige: *Fizicheskie osnovy teorii klimata i ego modelirovaniya* // *Trudy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, organizovannoj VMO i MSRS pri podderzhke programmy OON po okruzhayuschej srede*. Stokgol'm, 29 iyulya - 10 avgusta 1974 g. M.: Gidrometeoizdat, 1977. pp. 137–141.
5. Ochenochnyj doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii. T. 1. *Izmeneniya klimata*. M.: Rosgidromet, 2008. 227 p.
6. *Doklad Rosgidrometa ob osobennostyah klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2013 god*. M.: Rosgidromet, 2014. 246 p.
7. Kistler R. Reanalysis at NCEP: Past, Present and Future [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/workshops/V1-103_ea.pdf (дата обращения: 21.12.2018).
8. NCEP/NCAR Reanalysis Project. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.esrl.noaa.gov/pcd/data/reanalysis/reanalysis.shtml> (дата обращения: 21.12.2018).
9. Frich et al. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century // *Climate Res.* 2002. Vol. 19. pp. 193–212.
10. Bruks K., Karuzers N. *Prilozhenie statisticheskikh metodov v meteorologii*. L.: Gidrometeoizdat, 1963. 416 p.

© Задорожная Т.Н., Закусилов В.П., Бучнев Д.В., 2019

Задорожная Тамара Николаевна, кандидат географических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А.

Закусилов Вадим Павлович, кандидат географических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А.

Бучнев Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, заместитель начальника отдела научно-исследовательского научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, d_buch@list.ru.