

ДОЛГОПЕРИОДНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ТАТАРСТАНЕ И ИХ СЦЕНАРИИ В ТЕКУЩЕМ СТОЛЕТИИ

Ю. П. ПЕРЕВЕДЕНЦЕВ¹⁾, К. М. ШАНТАЛИНСКИЙ¹⁾,
Б. Г. ШЕРСТЮКОВ²⁾, А. А. НИКОЛАЕВ¹⁾

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

²⁾Всероссийский научно-исследовательский институт
гидрометеорологической информации – Мировой центр данных,
ул. Королева, 6, 249035, г. Обнинск, Калужская обл., Россия

Рассмотрены долгопериодные колебания температуры воздуха на территории Республики Татарстан в XX–XXI вв. Определены периоды однозначного изменения приземной температуры воздуха. Установлено, что с 1970-х гг. по 2017 г. средняя зимняя температура в Приказанском регионе выросла более чем на 3 °С, а средняя летняя температура увеличилась приблизительно на 2 °С. Показан вклад процессов глобального масштаба в изменчивость температуры Приказанского региона: зимой он составил 37 %, летом – 23 %. Выполнен корреляционный анализ аномалий среднегодовой температуры воздуха в Казани и рядов аномалий температуры воздуха над континентами, а также температуры поверхности океана в каждом узле координат на земном шаре за 1880–2017 гг. Обнаружены дальние связи в поле температуры между Казанью и удаленными регионами Земли. Отмечено, что долгопериодные колебания климата в Казани происходят синхронно с колебаниями температуры воздуха в высоких широтах Азии и Северной Америки, на Дальнем Востоке и юге Австралии, а также с изменениями температуры поверхностных вод в Северном Ледовитом, Индийском и Тихом океанах. Высказано предположение о наличии глобального механизма, регулирующего долгопериодные колебания климата на всей Земле в течение рассмотренного 200-летнего интервала наблюдений. По данным проекта CMIP5 построены климатические сценарии для Казани до конца XXI в.

Ключевые слова: температура воздуха; изменения климата; линейный тренд; климатические модели; климатические сценарии.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 18-05-00721 и № 18-45-160006).

Образец цитирования:

Переведенцев ЮП, Шанталинский КМ, Шерстюков БГ, Николаев АА. Долгопериодные изменения температуры воздуха в Татарстане и их сценарии в текущем столетии. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2019;2:94–107.
<https://doi.org/10.33581/2521-6740-2019-2-94-107>

For citation:

Perevedentsev YuP, Shantalinskii KM, Sherstukov BG, Nikolaev AA. Long-period changes of the air temperature in Tatarstan and their forecast till the end of the 21st century. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2019; 2:94–107. Russian.
<https://doi.org/10.33581/2521-6740-2019-2-94-107>

Авторы:

Юрий Петрович Переведенцев – доктор географических наук, профессор; заведующий кафедрой метеорологии, климатологии и экологии атмосферы Института экологии и природопользования.

Константин Михайлович Шанталинский – кандидат географических наук, доцент; доцент кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы Института экологии и природопользования.

Борис Георгиевич Шерстюков – доктор географических наук; заведующий лабораторией исследования последствий изменения климата.

Александр Анатольевич Николаев – кандидат географических наук, доцент; доцент кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы Института экологии и природопользования.

Authors:

Yuri P. Perevedentsev, doctor of science (geography), full professor, head of the department of meteorology, climatology and atmospheric environment, Institute of environmental sciences. ypereved@kpfu.ru

Konstantin M. Shantalinskii, PhD (geography), docent; associate professor at the department of meteorology, climatology and atmospheric environment, Institute of environmental sciences. kshantal@kpfu.ru

Boris G. Sherstukov, doctor of science (geography); head of the laboratory of climate change impact. boris@meteo.ru

Alexander A. Nikolaev, PhD (geography), docent; associate professor at the department of meteorology, climatology and atmospheric environment, Institute of environmental sciences. aleksandrnikolaev@kpfu.ru

LONG-PERIOD CHANGES OF THE AIR TEMPERATURE IN TATARSTAN AND THEIR FORECAST TILL THE END OF THE 21st CENTURY

*Yu. P. PEREVEDENTSEV^a, K. M. SHANTALINSKII^a,
B. G. SHERSTUKOV^b, A. A. NIKOLAEV^a*

^a*Kazan Federal University, 18 Kremlyovskaya Street, Kazan 420008, Russia*

^b*Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center,
6 Koroleva Street, Obninsk 249035, Kaluga region, Russia*

Corresponding author: Yu. P. Perevedentsev (ypereved@kpfu.ru)

Long-term changes in air temperature on the territory of the Republic of Tatarstan in the 20th–21st centuries are considered. The periods of unambiguous changes in the surface air temperature are determined. It is established that the average winter temperature from the 1970s to 2017, increased in the Kazan region by more than 3 °C and the average summer temperature increased by about 2 °C over the same period. The contribution of global scale processes to the variability of the temperature of the Kazan region is shown: it was 37 % in winter, 23 % in summer. The correlation analysis of the anomalies of average annual air temperature in Kazan and the series of air temperature anomalies in each node over the continents, as well as the ocean surface temperature in each coordinate node on Earth for 1880–2017, was performed. Long-distance communications were detected in the temperature field between Kazan and remote regions of the Earth. It is noted that long-period climate fluctuations in Kazan occur synchronously with fluctuations in the high latitudes of Asia and North America, with fluctuations in ocean surface temperature in the Arctic ocean, with fluctuations in air temperature in the Far East, and with fluctuations in ocean surface temperature in the Southern hemisphere in the Indian and Pacific oceans, as well as air temperature in southern Australia. It is suggested that there is a global mechanism that regulates long-term climate fluctuations throughout the Earth in the considered interval of 200 years of observations. According to the CMIP5 project, climatic scenarios were built for Kazan until the end of the 21st century.

Keywords: air temperature; climate change; linear trend; climate models; climatic scenarios.

Acknowledgements. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grants No. 18-05-00721 and No. 18-45-160006).

Введение

Современное состояние исследований в области климата отражено в оценочных докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [1] и Росгидромета [2]. В 2011 г. на XVI Всемирном метеорологическом конгрессе утверждена глобальная рамочная основа для климатического обслуживания (ГРОКО), включающая в себя системы гидрометеорологических наблюдений и моделирования климата, информационную климатическую систему и систему обеспечения климатической информацией пользователей секторов экономики и социальной сферы. Все это должно способствовать адаптации к происходящим климатическим изменениям, управлению возникающими рисками. В разных регионах России ведутся исследования по изучению изменчивости климата и динамики показателей его экстремальности. Так, в 2008 г. коллективом кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы Казанского федерального университета была опубликована монография «Климатические условия и ресурсы Республики Татарстан» [3], в которой дана оценка изменениям климата и климатических ресурсов по результатам метеорологических наблюдений за 1966–2004 гг. Вместе с тем необходимо отметить, что за последние 14 лет произошли заметные изменения регионального климата: в зимний период возникла тенденция к понижению температуры, а в летний – к ее повышению. Достаточно упомянуть длительную засуху летом 2010 г., когда температура в Татарстане достигала 39 °C, что привело к снижению урожайности сельскохозяйственных культур на 51–65 % по сравнению со средней урожайностью за предшествующие 5 лет. Кроме того, в июле – августе 2010 г. резко возросла смертность среди пожилых людей из-за крайне неблагоприятных экстремальных условий [4].

Республика Татарстан по своим экономическим показателям и развитию социальной сферы входит в число лидеров Российской Федерации. Тем не менее ряд ее отраслей, и прежде всего сельское, лесное и жилищно-коммунальное хозяйство, рекреационно-туристский комплекс, зависят как от экстремальных явлений погоды, так и от долговременных климатических изменений. Пример тому – интенсивные

засухи 1995, 1998, 1999, 2010 и 2016 гг., принесшие значительный ущерб сельскому и лесному хозяйству. Поэтому изучение настоящих и будущих распределений показателей климата, оценка климатического потенциала региона (тепло- и влагообеспеченности, радиационного баланса, продолжительности периодов с экстремальными значениями температуры воздуха и атмосферных осадков) в интересах экономики и населения представляются актуальными.

Целью работы является анализ долгопериодных изменений температуры воздуха в Татарстане в XX и XXI вв.

Материалы и методы исследования

В качестве исходного материала исследования были использованы средние месячные значения температуры воздуха за период с 1928 по 2017 г. на метеорологических станциях Казань-университет, Вязовые и Арск. Станция Казань-университет находится в центре города, станция Вязовые располагается в 40 км к западу от Казани, а станция Арск – в 60 км к северо-востоку (рис. 1).

По средним месячным данным рассчитаны средние годовые (январь – декабрь), зимние (декабрь – февраль) и летние (июнь – август) значения температуры воздуха.

В целях выявления наиболее крупномасштабных изменений были использованы временные ряды аномалий приповерхностной температуры воздуха, осредненной по территории Северного полушария (1928–2017), которые подготовлены в отделе исследования климата Университета Восточной Англии (далее – данные CRU) [5].

Для обнаружения дальних связей в поле температуры между Казанью и удаленными регионами Земли использовались материалы наблюдений за температурой воздуха (ТВ) на метеорологической станции Казань-университет за 1828–2017 гг., а также сведения о температуре поверхности океана (ТПО) в узлах географической сетки с шагом $2 \times 2^\circ$ широты и долготы за 1854–2017 гг. [6–8] и данные CRU о температуре воздуха над континентами в узлах географической сетки с шагом $5 \times 5^\circ$ широты и долготы за 1880–2017 гг.

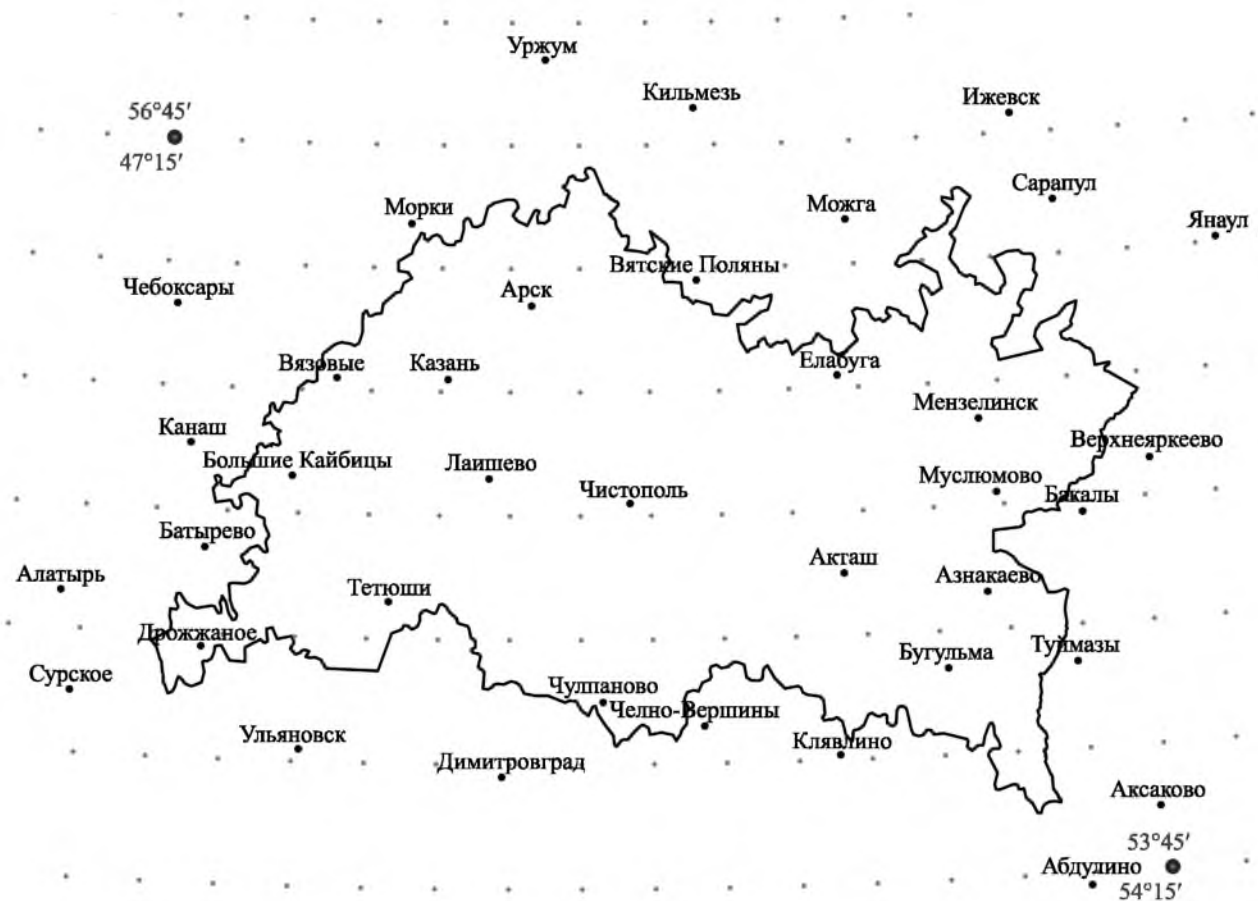


Рис. 1. Расположение метеорологических станций в Татарстане и на сопредельных территориях
Fig. 1. Location of meteorological stations in Tatarstan and in adjacent territories

Массив данных о ТПО ERSST v3b представляет собой восстановленные ряды месячных аномалий температуры поверхности океана относительно норм за 1971–2000 гг. Заполнение пропусков статистическими методами выполнено авторами массива. В отличие от версии ERSST v3 новая версия ERSST v3b не включает спутниковые данные, которые, как было установлено, вызывают слишком сильное смещение.

Массив данных о ТВ над континентами содержит аномалии месячной температуры в узлах географической сетки с шагом $5 \times 5^\circ$ широты и долготы относительно норм за 1961–1990 гг. [5].

Для исследования долгопериодных изменений температурного режима применялись сглаживание временных рядов 7-летним скользящим осреднением, низкочастотная цифровая фильтрация (НЧ фильтр Поттера), метод корреляционного анализа.

Нами было проведено тестирование 38 климатических моделей последнего поколения CMIP5 (*coupled model intercomparison project*) по ряду критериев, таких как коэффициент наклона линейного тренда (КНЛТ), разность климатических норм, коэффициент парной корреляции между смоделированными температурами воздуха и результатами наблюдений, среднее абсолютное отклонение (δ), среднеквадратическая ошибка прогноза (σ).

По итогам комплексного анализа результатов тестирования были отобраны 7 наиболее эффективных моделей – BNU-ESM, CMCC-CM, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR, GISS-E2-H, EC-EARTH, FIO-ESM, которые использовались для получения климатических проекций в Казани на период 2005–2100 гг.

Прогностические расчеты базировались на результатах ансамблевых расчетов отобранных 7 климатических моделей из проекта CMIP5. Модельные данные по реконструкции температурного ряда в период 1850–2005 гг. сравнивались с данными метеонаблюдений на метеостанции Казань-университет.

Результаты и их обсуждение

Современные изменения климата, сопровождающиеся все более частыми и интенсивными природными катаклизмами, оказываются наиболее чувствительными для природы, экономики и населения конкретных регионов. Становится актуальной задача оценить роль естественных (тепловое состояние поверхности Атлантического океана, циркуляция атмосферы, солнечная и геомагнитная активность) и антропогенных факторов (рост концентрации парниковых газов) в формировании погодных и климатических аномалий, включая экстремальные, на территории Татарстана, исследовать динамику климатических ресурсов и спрогнозировать будущие изменения климата в интересах экономики и населения [3; 9; 10].

Изменения приземной температуры в Приказанском регионе. Рассмотрим температурный режим в Приказанском регионе в целях определения степени влияния на него факторов различного масштаба и оценки возможных изменений температуры в будущем (табл. 1).

Таблица 1

Средние квадратические отклонения, средние многолетние, максимальные и минимальные значения приземной температуры воздуха (°C) в Приказанском регионе за различные периоды осреднения

Table 1

Mean square deviations, average long-term, maximum and minimum values of surface air temperature (°C) in the Kazan region for different periods of averaging

Характеристики температуры воздуха	Год (январь – декабрь)			Зима (декабрь – февраль)			Лето (июнь – август)		
	Казань	Вязовые	Арск	Казань	Вязовые	Арск	Казань	Вязовые	Арск
1928–2017 гг.									
Норма	4,57	3,77	3,17	–10,41	–11,11	–11,89	19,10	18,20	17,83
СКО	1,19	1,17	1,18	2,76	2,77	2,75	1,40	1,35	1,39
Макс.	6,91	6,13	5,68	–5,33	–6,20	–6,84	24,03	22,90	22,63
Мин.	1,42	0,63	0,12	–17,50	–18,17	–18,80	16,30	15,20	14,73
1928–1957 гг.									
Норма	3,85	3,12	2,52	–11,91	–12,43	–13,21	18,99	18,12	17,77
СКО	0,99	0,97	0,96	2,65	2,68	2,62	1,27	1,21	1,26
Макс.	5,50	4,73	4,03	–6,80	–7,30	–8,23	21,23	20,31	20,13
Мин.	1,42	0,63	0,12	–17,50	–18,17	–18,80	16,30	15,20	14,73

Окончание табл. 1
Ending table 1

Характеристики температуры воздуха	Год (январь – декабрь)			Зима (декабрь – февраль)			Лето (июнь – август)		
	Казань	Вязовые	Арск	Казань	Вязовые	Арск	Казань	Вязовые	Арск
1958–1987 гг.									
Норма	4,28	3,43	2,80	-10,47	-11,33	-12,07	18,55	17,66	17,27
СКО	1,00	1,03	1,02	2,61	2,67	2,66	1,26	1,31	1,32
Макс.	6,23	5,48	4,92	-5,33	-6,20	-7,03	22,03	21,43	21,23
Мин.	1,80	0,93	0,27	-16,77	-17,47	-18,40	16,67	15,50	15,10
1988–2017 гг.									
Норма	5,59	4,77	4,20	-8,87	-9,58	-10,38	19,75	18,81	18,44
СКО	1,12	1,12	1,14	2,51	2,59	2,59	1,46	1,43	1,46
Макс.	5,00	4,18	3,72	-10,43	-11,27	-11,97	21,43	20,80	20,63
Мин.	3,96	3,18	2,66	-13,13	-13,97	-14,67	16,67	15,93	15,80

Примечание. Норма – средние многолетние значения; СКО – средние квадратические отклонения; макс. и мин. – максимальные и минимальные величины соответственно.

Многолетний ход температуры на станциях региона практически аналогичен. Коэффициенты корреляции во все сезоны года превосходят величину 0,95. Однако связи во второй половине исследуемого периода, когда наблюдается современный этап глобального потепления, выше (коэффициент корреляции не менее 0,98). Особенности изменений термического режима в Казани связаны со специфическими условиями крупного города.

Выполненное сглаживание временных рядов аномалий температуры относительно норм 1961–1990 гг. при помощи низкочастотной фильтрации с полосой пропускания более 20 лет также обнаруживает существенный рост температуры как на территории всего Северного полушария, так и в Приказанском регионе (рис. 2).

Кроме того, сглаживание позволило более детально определить периоды однозначного изменения приземной температуры воздуха. Так, зимой с 1928 по 1957 г. температура в исследуемом регионе повышалась со скоростью порядка 0,6–0,8 °С за 10 лет, далее до 1970 г. отмечалось некоторое понижение температуры на величину около 0,8 °С. Затем с начала 1970-х гг. происходило интенсивное потепление климата Приказанского региона, которое с конца XX в. существенно ослабло и сменилось незначительным похолоданием, а в конце первого десятилетия XXI в. зимняя температура вновь стала увеличиваться. В результате по кривой низкочастотной компоненты средняя зимняя температура с 1928 по 2017 г. в Казани выросла на 4,7 °С, в Вязовых – на 4,2 °С, в Арске – на 4,1 °С.

Иначе изменялась средняя летняя температура воздуха. В начале исследуемого интервала примерно до второй половины 1970-х гг. температура в общем понижалась, испытывая колебания с периодом около 20 лет. За это время снижение составило примерно 1,3 °С за городом и приблизительно 0,7 °С в Казани, что явилось следствием отепляющего влияния городских условий. С середины 1970-х гг. в Приказанском регионе, как и в целом по полушарию, началось интенсивное потепление, в результате которого средняя летняя температура увеличилась на 1,9 °С за городом и на 2,2 °С в Казани.

Изменения средней годовой температуры воздуха носили более равномерный характер. Рост средней годовой температуры начался с середины 1940-х гг., и до 1990 г. его скорость в Казани была 0,17 °С за 10 лет, а за городом составляла 0,11–0,12 °С за 10 лет. Далее потепление происходило более высокими темпами: в Казани скорость повышения средней годовой температуры в этот промежуток времени достигла 0,6 °С за 10 лет, а в сельской местности – 0,5 °С за 10 лет. В результате в Казани с 1945 по 2017 г. средняя годовая температура увеличилась на 2,7 °С, а в Вязовых и Арске – на 2,1 °С. Таким образом, как уже указывалось ранее, повышение средней годовой температуры за весь исследуемый период определялось в основном увеличением средней зимней температуры.

Как видно из рис. 2, изменения температуры в Приказанском регионе хотя и носили более резкий характер, тем не менее протекали достаточно согласованно с изменениями температуры всего Северного полушария как зимой, так и летом. Особенно это относится к последнему этапу потепления, начавшемуся в середине 1970-х гг. Указанные колебания температуры воздуха являются результатом действия глобальных, региональных и локальных факторов. Для оценки вклада глобальных факторов в изменчивость температур Приказанского региона вычислялись коэффициенты корреляции аномалий

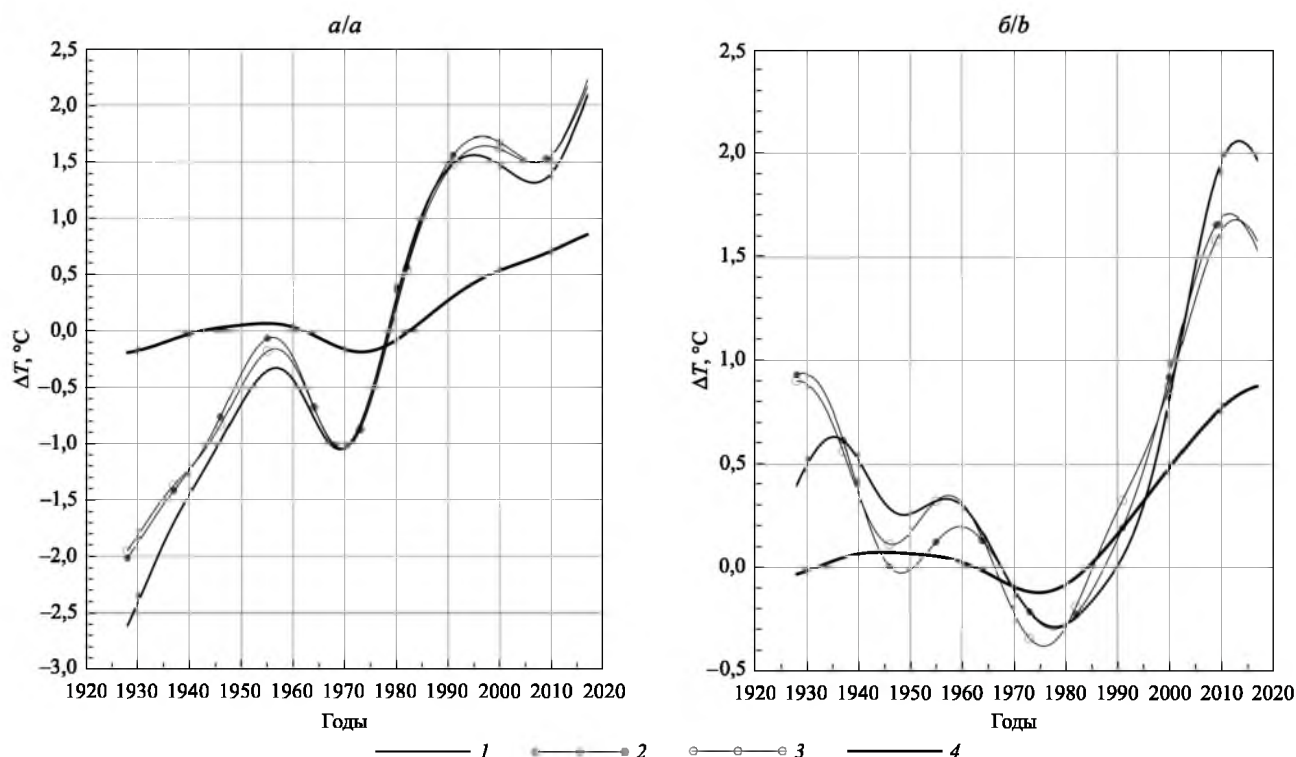


Рис. 2. Низкочастотная компонента с периодом более 20 лет аномалий приземной температуры воздуха (°C) в Приказанском регионе и Северном полушарии зимой (декабрь – февраль) (а) и летом (июнь – август) (б):
1 – Казань-университет; 2 – Вязовые; 3 – Арск; 4 – Северное полушарие (по данным CRU)

Fig. 2. Low-frequency component with a period of more than 20 years of anomalies of surface air temperature (°C) in the Kazan region and the Northern hemisphere in winter (December – February) (a) and in summer (June – August) (b):
1 – Kazan-university; 2 – Vyazovye; 3 – Arsk; 4 – Northern hemisphere (according to CRU)

температур региона и Северного полушария в целом, причем не только за весь исследуемый период, но и за два подпериода, первый из которых представляет собой промежуток времени, предшествовавший последнему потеплению (1928–1976), второй – собственно наиболее выраженную часть этого потепления (с 1977 по 2017 г.).

Значения коэффициентов корреляции за весь период исследования зимой составили около 0,61, а летом – 0,48. В 1928–1976 гг. они равнялись 0,52 и 0,40 соответственно, а в 1977–2017 гг. – 0,52 и 0,53. Увеличение коэффициента в летний сезон последнего периода связано с более равномерным повышением летней температуры в этот промежуток времени. Поскольку квадрат коэффициента корреляции характеризует вклад факториального признака в изменчивость результативного признака, а колебания температуры всего Северного полушария определяются влиянием процессов глобального масштаба, можно оценить вклад последних в изменчивость температуры Приказанского региона. Этот вклад не остается постоянным в течение года. За весь же исследуемый период зимой он составил 37 %, а летом – 23 %.

Дальние связи в поле температуры между Казанью и удаленными регионами Земли. В проблеме колебаний климата важное место занимают климатические вариации в масштабах времени от нескольких лет до нескольких веков. Изменения температуры в соседних пунктах обычно взаимозависимы. Корреляция колебаний метеорологических параметров возможна как на близких метеостанциях в пределах замкнутой территории, так и в удаленных друг от друга районах. Для удаленных взаимодействий применяется термин «дальние связи».

Пространственные масштабы очагов однородных колебаний климата связаны с их временными масштабами. При этом механизмы формирования хорошей корреляции изменений температуры во времени на близких расстояниях и в удаленных районах могут быть разными, поэтому пространственные корреляции долгопериодных колебаний рассматриваются в данной работе отдельно от короткопериодных.

В целях поиска приповерхностных долговременных дальних связей между Казанью и удаленными точками земного шара проведено следующее исследование.

За 200-летнюю историю метеорологических наблюдений в Казани можно выделить составляющие колебаний климата с разными частотами. На рис. 3 показан многолетний ход среднегодовой температуры воздуха в Казани и ее сглаженные по 7 годам значения.

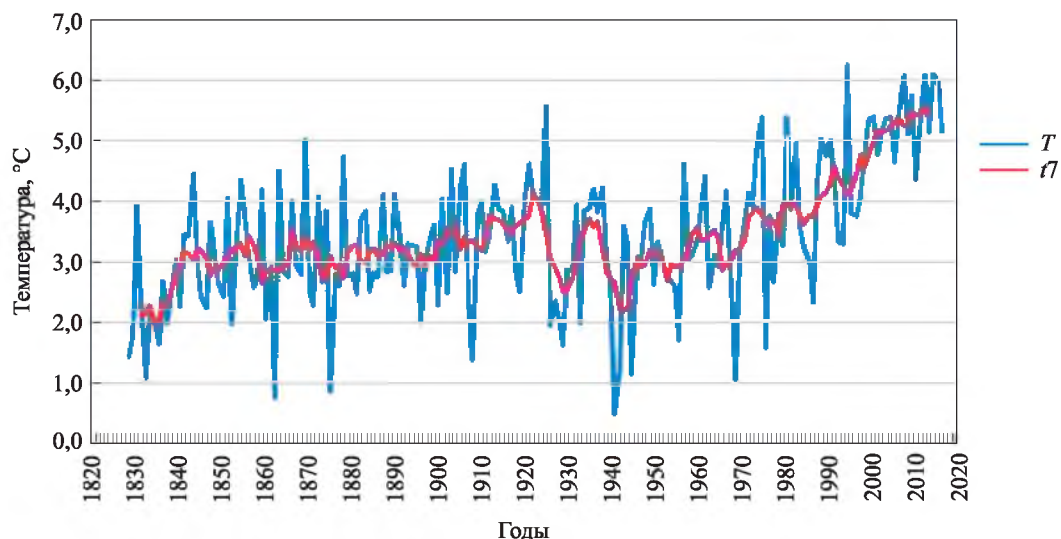


Рис. 3. Среднегодовая температура воздуха (T) и ее сглаженные по 7 годам значения (t_7) в Казани

Fig. 3. Average annual air temperature (T) and its 7-year smoothed values (t_7) in Kazan

Известно, что в XX в. на Земле наблюдались два глобальных потепления климата: первое происходило в 1930–40-х гг., второе началось с середины 1970-х гг. По версии МГЭИК, первое потепление вызвано природными причинами, а второе является следствием усиления парникового эффекта за счет антропогенного увеличения концентрации углекислого газа в атмосфере [1].

В Казани подобные изменения климата происходили на 20–30 лет раньше, чем на всем земном шаре. Так, в эпоху первого глобального потепления наивысшая среднегодовая температура воздуха в Казани наблюдалась в 1925 г. Затем она понижалась до минимума в 1941 г., а начиная с 1942 г. и до настоящего времени повышается.

За последние 200 лет, кроме указанных двух потеплений, на рис. 3 видны межгодовые колебания температуры с периодами от нескольких лет до двух-трех десятилетий. Предметом исследований были колебания с периодами более 7 лет.

Далее рассмотрим многолетние колебания аномалий среднегодовой температуры в Казани после исключения линейного тренда и сглаживания короткопериодных колебаний температуры методом скользящих средних по 7-летиям. Тренд исключался на интервале 1880–2017 гг. Аналогично тренды были исключены из среднегодовых сглаженных по 7-летиям значений температуры воздуха над континентами в узлах $5 \times 5^\circ$ географической сетки и из среднегодовых сглаженных таким же образом значений температуры поверхности Мирового океана в узлах $2 \times 2^\circ$.

Вычислялись коэффициенты корреляции между рядом полученных аномалий среднегодовой температуры воздуха в Казани и рядами аномалий температуры воздуха над континентами и температуры поверхности океана в каждом узле географической сетки на Земле за 1880–2017 гг. Пространственное распределение полученных коэффициентов корреляции показано на карте (рис. 4).

Из рис. 4 видно, что тесные связи с коэффициентами корреляции выше 0,6 наблюдаются в обширном районе на географических широтах, близких к Казани, и на долготах от Центрального региона России до Урала и даже в прилегающей части Западной Сибири. Данный район однотипных колебаний температуры находится в зоне основного западно-восточного переноса воздушных масс, который способствует распространению пространственных связей вдоль географической широты. Далее, во все стороны от Казани и указанного прилегающего региона пространственные связи ослабевают.

Однако на некотором удалении коэффициенты корреляции опять возрастают (см. рис. 4), показывая дальние связи колебаний температуры в Казани и других районах Северного и Южного полушарий Земли. Судя по большим коэффициентам корреляции (свыше 0,5), долгопериодные колебания климата в Казани происходят синхронно с колебаниями температуры воздуха в высоких широтах Азии и Северной Америки, на Дальнем Востоке и юге Австралии, а также с изменениями температуры поверхностных вод в Северном Ледовитом, Индийском и Тихом океанах.

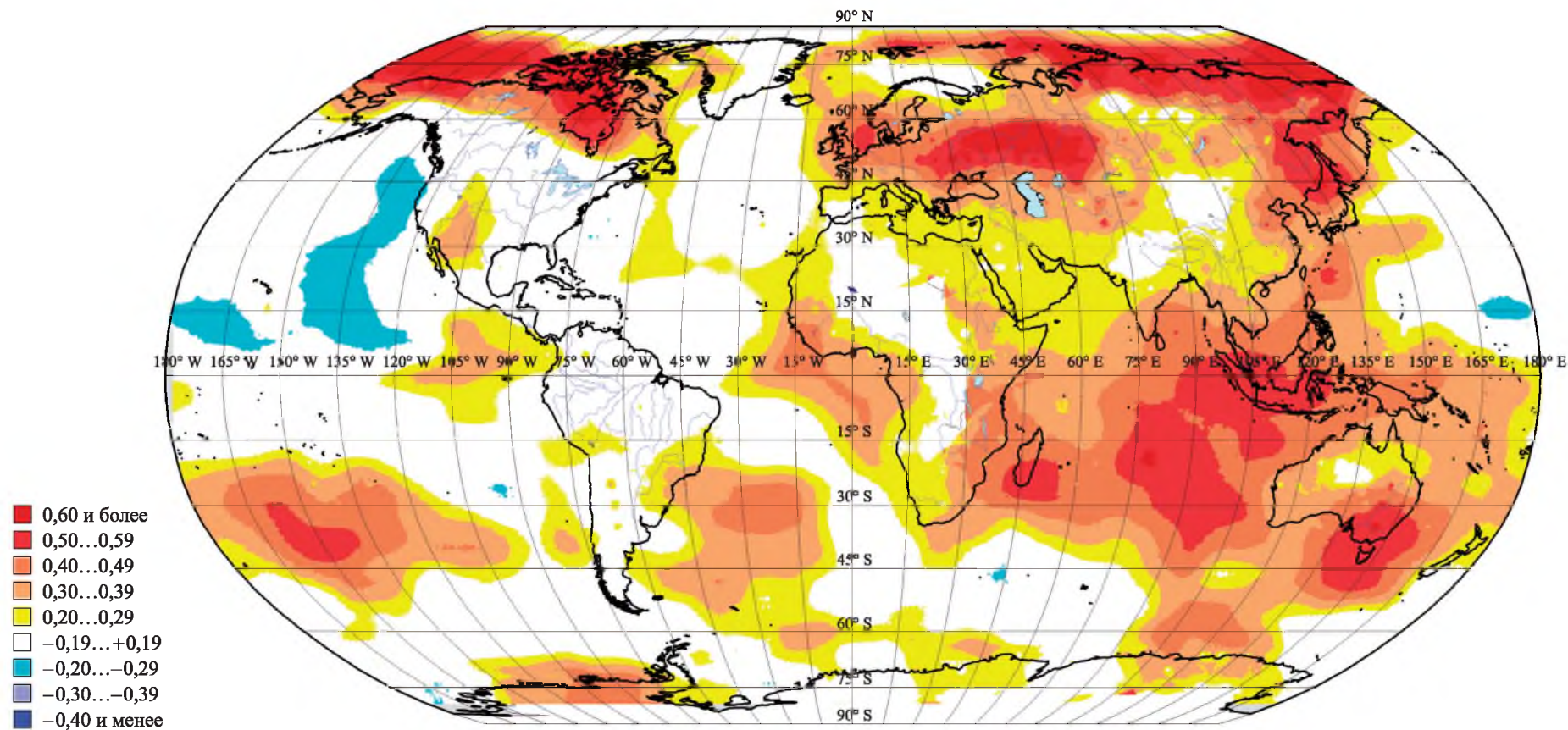


Рис. 4. Коэффициенты корреляции среднегодовой температуры в Казани с температурой воздуха над континентами в узлах через 5° широты и долготы, а также с температурой поверхности океана в узлах через 2° широты и долготы за 1880–2017 гг. (температура сглажена по 7-летиям, линейный тренд исключен)

Fig. 4. Correlation coefficients of average annual temperature in Kazan with air temperature over continents in nodes of 5° grid and ocean surface temperature in nodes of 2° grid for 1880–2017 (temperature is smoothed on 7 years, the linear trend is excluded)

На рис. 5 показаны колебания климата в Казани и на юге Австралии.

Коэффициент корреляции между колебаниями ТВ в Казани и на юге Австралии оказался равным 0,78. Если пространственные связи в районах, непосредственно прилегающих к Казани, можно объяснить адвекцией и перемешиванием воздушных масс, то связи с удаленными областями адвекцией объяснить нельзя.

Каждый из отмеченных районов дальних связей имеет свои особенности, заслуживающие дополнительного изучения. В приполярной части Северного полушария области высоких корреляций охватывают регион северного магнитного полюса и авроральную зону, в которую попадают заряженные частицы при магнитных бурях в годы повышенной солнечной активности. Пространственная структура магнитного поля Земли создает в высоких широтах наиболее благоприятные условия для вторжения заряженных солнечных частиц в верхнюю атмосферу. В этой же части Северного Ледовитого океана вдоль побережья проходит океаническое течение и идет интенсивный теплообмен в системе океан – атмосфера в теплый сезон.

На Дальнем Востоке вдоль всего побережья районы повышенной корреляции аномалий температуры в Казани с температурой в узлах сетки охватывают области мощных течений Тихого океана. И на территории Австралии наиболее вероятным источником колебаний климата являются колебания характеристик самого мощного океанического течения западных ветров.

В Индийском океане области высоких корреляций колебаний ТПО с температурой в Казани совпадают с зонами пассатных течений в районе Австралии и Океании и особенно в Южно-Китайском море.

На основе приведенных фактов возникает предположение о наличии глобального механизма, регулирующего долгие колебания климата на всей Земле на протяжении 200-летней истории метеорологических наблюдений. Очевидно, что работа этого природного механизма началась задолго до исследуемого временного интервала наблюдений и продолжается до сих пор. Если первое глобальное потепление в Казани и на Земле являлось очередной волной мультидекадных природных колебаний, то подобные колебания климата должны повторяться. В Казани второе потепление началось в 1942 г., в других областях – позднее или раньше в зависимости от региональных условий.

Сторонники антропогенной гипотезы современного потепления климата его началом считают середину 1970-х гг., именно в эти годы человечество вошло в эпоху интенсивного сжигания ископаемого топлива и ускоренного повышения концентрации углекислого газа в атмосфере. Если в последней четверти XX в. добавился антропогенный фактор, то нельзя все потепление в эти годы считать антропогенным. Основу изменений климата, как и раньше, составляют природные колебания с неизменным механизмом на протяжении всей истории человечества. Подтверждением этого являются дальние связи на долгопериодных колебаниях климата, установившиеся гораздо раньше антропогенного усиления парникового эффекта.

Для сравнения проведен анализ дальних связей на короткопериодных (не более 7 лет) колебаниях климата (рис. 6).

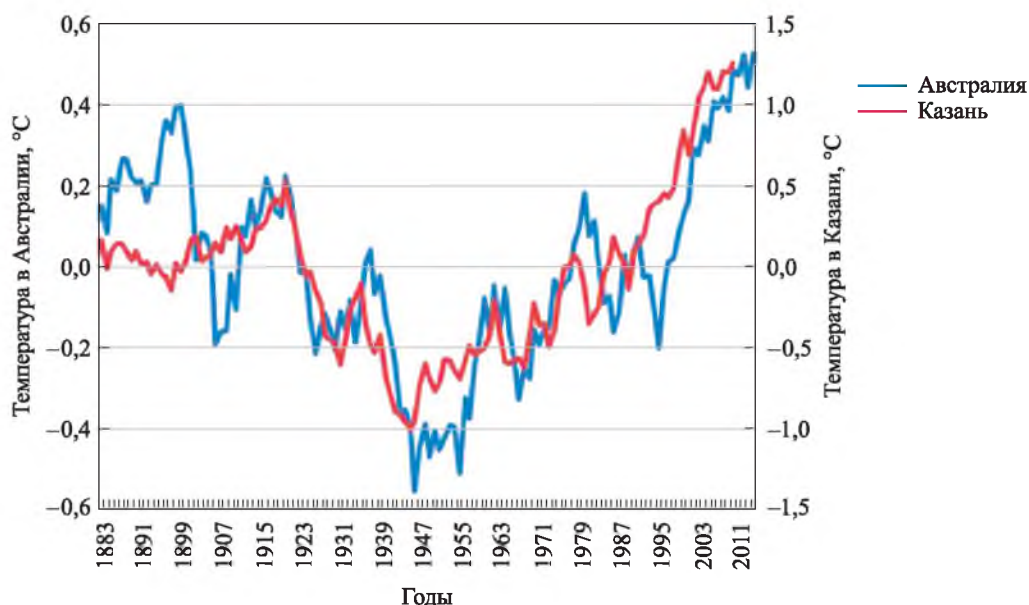


Рис. 5. Сглаженная температура (без тренда) в Казани и на юге Австралии (140° в. д., 35° ю. ш.)

Fig. 5. Smoothed temperature (without trend) in Kazan and South Australia (140° E, 35° S)

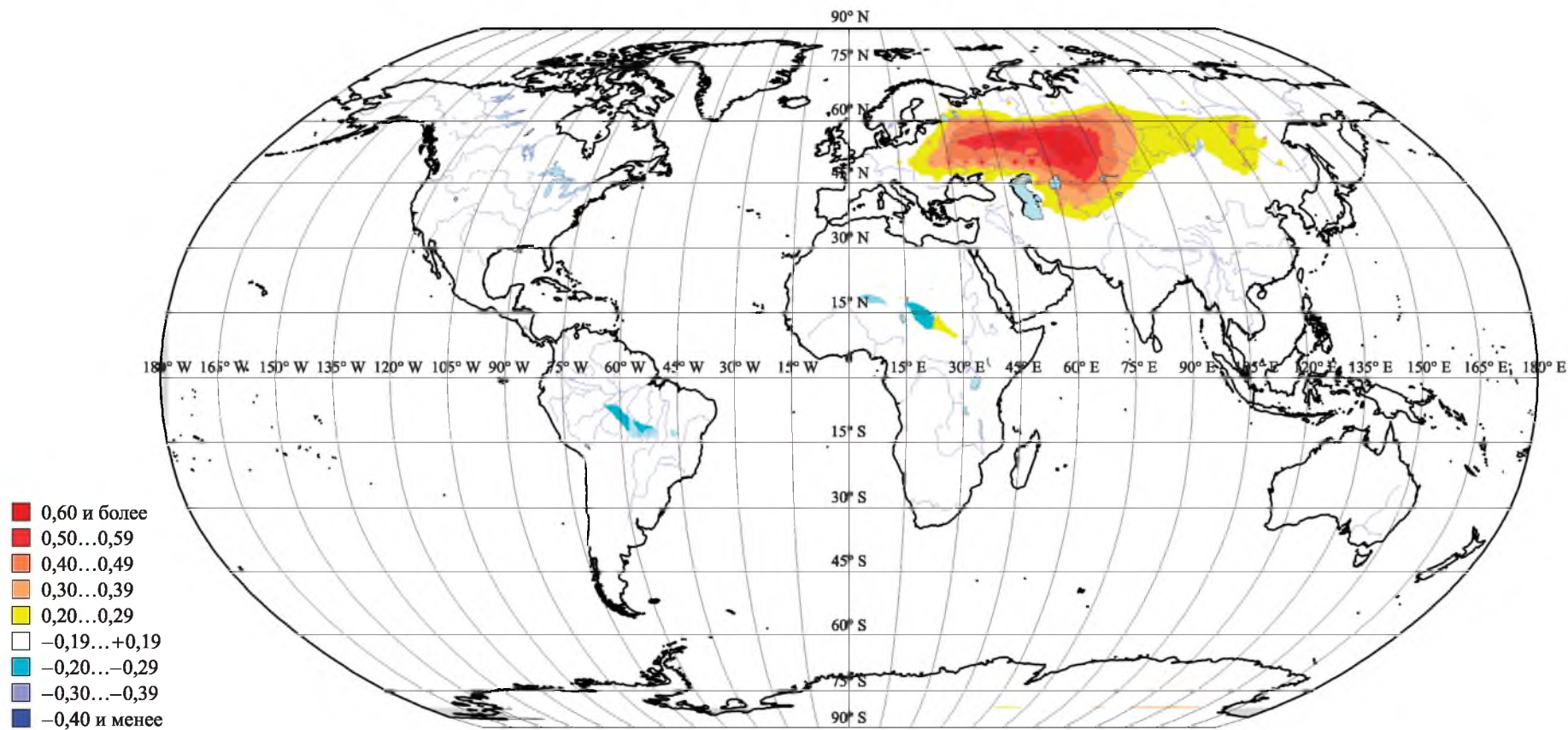


Рис. 6. Коэффициенты корреляций короткопериодных колебаний климата в Казани с колебаниями температуры в узлах

Fig. 6. Correlation coefficients of short-period climate fluctuations in Kazan with temperature fluctuations in the grid nodes

Из исходных среднегодовых значений были вычтены скользящие средние по 7-летиям. В результате в рядах отклонений остались колебания с периодами менее 7 лет. Аналогично получены ряды отклонений температуры в узлах. Вычислены коэффициенты корреляции между отклонениями температуры в Казани и аналогичными отклонениями температуры по всем узлам. На карту нанесены значения коэффициентов в узлах.

По короткопериодным колебаниям не выявлено дальних связей. Существенные корреляции обнаружены только в соседних с Казанью Центральном, Средневолжском регионах и в Западной Сибири на тех же широтах.

Показанные на рис. 4 дальние связи на долгопериодных колебаниях климата можно объяснить единым механизмом поддержания колебаний глобальной атмосферной и океанической циркуляции с участием теплообмена между океаном и атмосферой. А пространственные связи на короткопериодных колебаниях (см. рис. 6) – явление локальное, зависящее в большей мере от западно-восточного переноса воздушных масс и от региональных физико-географических условий.

Сценарии изменения температуры в Казани до конца XXI в. В последнее время большое количество исследований в мире посвящено изучению настоящих и будущих изменений климата Земли. Наиболее обширный анализ текущего состояния климата, его колебаний и их последствий представлен в оценочных докладах Всемирной метеорологической организации (ВМО), выпускаемых МГЭИК. Мировыми метеорологическими центрами и национальными службами регулярно издаются многочисленные обзоры мониторинга климата. В частности, информация об изменениях климата на территории России представлена в оценочных докладах Росгидромета [2] и ежегодных докладах о состоянии климата.

Следует заметить, что основным инструментом прогнозирования будущих изменений климата являются глобальные климатические модели общей циркуляции атмосферы и океана. В основе их лежит моделирование взаимодействия между различными компонентами климатической системы Земли и внешними факторами естественного и антропогенного характера. В этой связи наибольшую важность приобретает вопрос о соответствии модельных расчетов и фактических данных наблюдений, оценка которого применительно к России выполнялась в [11; 12]. Актуальность этого вопроса вызвана необходимостью принятия важных экономических и политических решений по адаптации к изменениям климата. Такая адаптация возможна, если неопределенность оценок соответствующих последствий не слишком велика. Иначе могут быть выбраны ошибочные стратегии, которые приведут к более значительному ущербу, чем потери, связанные с самими климатическими воздействиями. Принято считать, что достоверность расчетов изменений климата определяется способностью моделей воспроизводить его прошлое состояние. Для того чтобы убедиться, что модели правильно воспроизводят современный климат, нужно проводить их всестороннее тестирование относительно материалов наблюдений и проверять реакцию на различные внешние воздействия.

В настоящем исследовании в качестве исходных данных использовались результаты исторических расчетов температуры воздуха по 38 моделям проекта CMIP5 и наблюдения за температурой воздуха, проводившиеся в метеорологической обсерватории Казанского федерального университета в период 1861–2012 гг.

В работе рассматривались следующие модели CMIP5:

1) ACCESS1.3; 2) ACCESS1.0; 3) BCC-CSM1.1; 4) BCC-CSM1.1-m; 5) BNU-ESM; 6) CanESM2; 7) CCSM4; 8) CESM1-BGC; 9) CESM1-CAM5; 10) CMCC-CM; 11) CMCC-CMS; 12) CNRM-CM5; 13) CSIRO-Mk3-6-0; 14) EC-EARTH; 15) FGOALS_g2; 16) FIO-ESM; 17) GFDL-CM3; 18) GFDL-ESM2G; 19) GFDL-ESM2M; 20) GISS-E2-H; 21) GISS-E2-H-CC; 22) GISS-E2-R; 23) GISS-E2-R-CC; 24) HadGEM2-AO; 25) HadGEM2-CC; 26) HadGEM2-ES; 27) INMCM4; 28) IPSL-CM5A-LR; 29) IPSL-CM5A-MR; 30) IPSL-CM5B-LR; 31) MIROC5; 32) MIROC-ESM; 33) MIROC-ESM-CHEM; 34) MPI-ESM-LR; 35) MPI-ESM-MR; 36) MRI-CGCM3; 37) NorESM1-M; 38) NorESM1-ME.

Для уменьшения неопределенности климатических проекций, связанной со случайными ошибками отдельных моделей, широко применяется ансамблевый метод, состоящий в том, что результаты некоторого числа моделей усредняются. До недавнего времени считалось, что чем больше моделей входит в ансамбль, тем более точным является результат. При сравнении ансамблевых исторических расчетов, выполненных по 38 моделям проекта CMIP5, с фактическими данными температуры воздуха на территории Республики Татарстан было установлено, что эти результаты несколько завышены по сравнению с наблюдениями. Это показывает целесообразность проводить тестирование и исключать из ансамбля модели, которые воспроизводят изменения климата в рассматриваемом регионе с существенной ошибкой.

Согласно анализу данных рис. 7, где представлены результаты ансамблевых расчетов для сценариев RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5, в рассматриваемый период ожидается повышение температуры воздуха

в Казани как в январе, так и в июле. При этом величина изменения варьируется по сезонам и в зависимости от сценария концентрации парниковых газов. Наибольшие значения увеличения температуры воздуха по сезонам получены для сценария RCP8.5. В среднем по ансамблю ожидается рост среднеянварской температуры воздуха на 8,2 °С, среднеиюльской – на 5,2 °С.

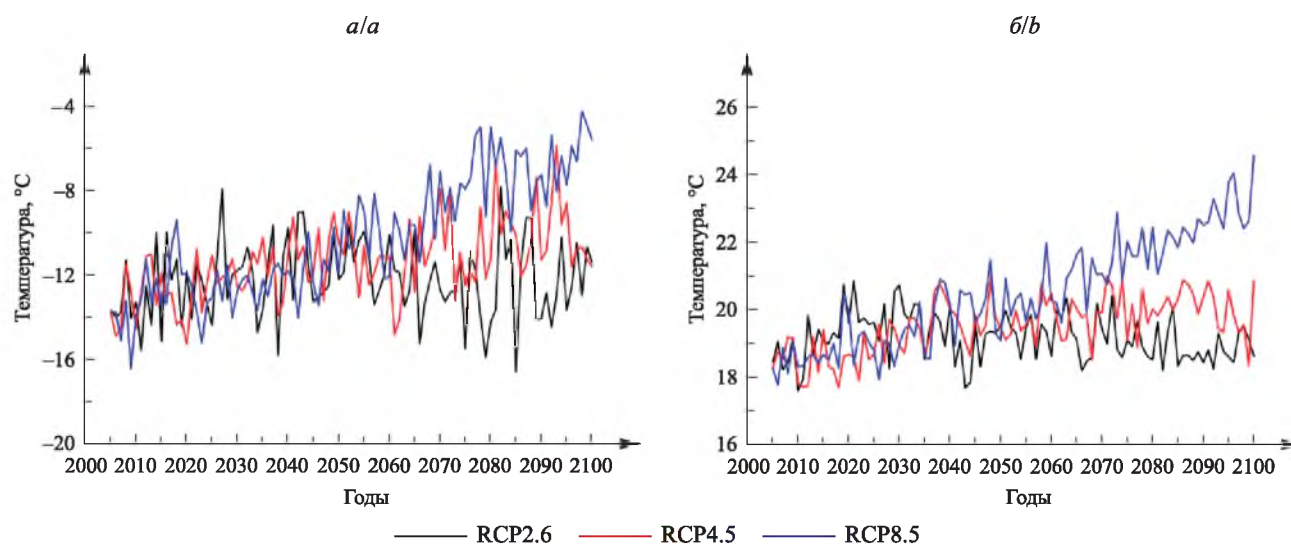


Рис. 7. Проекция среднемесячных значений температуры воздуха в январе (а) и июле (б) по ансамблю моделей за период 2005–2100 гг. для различных сценариев

Fig. 7. Projections of average monthly air temperature values in January (a) and July (b) for an ensemble of models for the period 2005–2100 for different scenarios

Выполненные расчеты по ансамблю моделей показали наличие значимых изменений температуры воздуха в Казани, а также параметров и климатических индексов, зависящих от исследуемых метеорологических величин. Прогнозируемые величины тесно связаны с положительными трендами температуры воздуха (табл. 2). Расчетные данные сезонных и годовых колебаний температуры воздуха варьируют в зависимости от типа модели. Величина разброса в некоторых случаях оказывалась значительной, но направленность процессов оставалась согласованной по большинству моделей.

Таблица 2

Коэффициент наклона линейного тренда температуры воздуха (градусов Цельсия за 10 лет) для ансамбля из 7 моделей CMIP5 для различных сценариев

Table 2

Linear trend inclination coefficient (degrees Celsius for 10 years) of air temperature for an ensemble of 7 CMIP5 models for different scenarios

Сценарий	Годы	Зима	Весна	Лето	Осень
RCP2.6	2005–2100	0,010	–0,004	–0,004	–0,019
	2005–2033	0,438	0,566	0,496	0,440
	2034–2066	–0,194	–0,172	0,035	–0,127
	2066–2100	–0,070	–0,100	–0,102	–0,048
RCP4.5	2005–2100	0,312	0,199	0,153	0,168
	2005–2033	0,642	0,505	0,430	0,499
	2034–2066	0,397	0,194	0,092	0,281
	2066–2100	0,241	0,125	0,027	–0,012
RCP8.5	2005–2100	0,804	0,545	0,534	0,591
	2005–2033	0,452	0,422	0,254	0,268
	2034–2066	0,736	0,390	0,380	0,530
	2066–2100	0,865	0,705	0,742	0,730

Величина температуры воздуха в большинстве случаев зависела от сценария изменения концентрации парниковых газов. Наименьшие изменения температуры были характерны для самого благоприятного сценария RCP2.6, а наибольшие – для агрессивного сценария RCP8.5, при котором ожидается самое значительное увеличение концентрации парниковых газов. Многолетние тренды температуры воздуха подтверждают идентичные тенденции изменения климатических характеристик и индексов. Как видно из табл. 2, при сценариях RCP4.5 и RCP8.5 во все месяцы 2005–2100 гг. имеет место рост температуры, причем наиболее велик он в зимний период, что может привести к существенным изменениям климата региона. Полученные расчетные значения температуры воздуха для рассматриваемой территории хорошо согласуются с результатами аналогичных исследований, выполняемых зарубежными и российскими учеными, и могут быть использованы при долгосрочных приближенных оценках климатических изменений в городе.

Заключение

По результатам исследования можно сделать следующие выводы.

1. Изменения приземной температуры воздуха в Приказанском регионе имеют неравномерный колебательный характер: в период с 1828 по 1957 г. зимой температура повышалась со скоростью 0,6–0,8 °С за 10 лет, а затем понизилась на 0,8 °С к 1970 г. С начала 1970-х гг. вновь происходило ее активное повышение, ослабевшее в конце XX в. (незначительное похолодание), в конце первого десятилетия XXI в. зимняя температура вновь стала возрастать. В целом для Казани средняя зимняя температура выросла на 4,7 °С, что на 0,5–0,6 °С больше, чем на сельских станциях.

2. Летняя температура в регионе, достигнув минимального значения в начале 1970-х гг., как и в зимний период, с середины 1970-х гг. интенсивно возрастает. Это привело к повышению средней летней температуры в Казани на 2,2 °С, за городом – на 1,9 °С. Вклад глобального фактора в изменчивость температуры Приказанского региона зимой составил 37 %, летом – 23 %.

3. Корреляционный анализ рядов аномалий среднегодовой температуры воздуха в Казани и рядов аномалий температуры в узлах регулярной сетки над континентами и океанами, полученных в результате исключения линейного тренда и сглаживания короткопериодных колебаний температуры методом скользящих 7-летних средних, показал, что наиболее тесные связи (коэффициенты корреляции свыше 0,6) наблюдаются между Казанью и прилегающими регионами европейской части России и Западной Сибири.

4. Долгопериодные колебания температуры в Казани происходят почти синхронно с изменениями температуры воздуха и поверхности океана в удаленных районах Северного и Южного полушарий Земли. Так, коэффициент корреляции между температурами воздуха в Казани и на юге Австралии достигает значения 0,78. Колебания температуры воздуха в Казани в разных временных масштабах имеют неодинаковую природу. Короткопериодные колебания (до 7 лет) вызваны локальными факторами. Связи обнаруживаются лишь с соседними регионами. Долгопериодные синхронные колебания температуры воздуха и температуры поверхности океана в разных частях Земли являются следствием некоторого общего глобального механизма поддержания колебаний глобальной атмосферной и океанической циркуляции с участием теплообмена в системе океан – атмосфера.

5. Наиболее тесные дальние связи колебаний температуры в Казани обнаружены с колебаниями в районах течений в Тихом, Индийском и Северном Ледовитом океанах, а также в области северного магнитного полюса и в зоне высоких широт, в которых магнитное поле Земли создало наиболее благоприятные условия для вторжения в верхнюю атмосферу заряженных частиц из космоса.

6. По данным ансамбля климатических моделей CMIP5 получены оценки долгопериодных изменений температуры воздуха в Казани до конца XXI в. за счет антропогенного фактора. В частности, по наиболее «жесткому» сценарию RCP8.5 к концу столетия ожидается повышение среднеянварской температуры приблизительно на 8 °С, а среднеиюльской – примерно на 4 °С. Безусловно, данная оценка завышена, поскольку не учитывает влияние естественных факторов и преувеличивает роль антропогенного воздействия.

Библиографические ссылки

1. Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, et al., editors. *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press; 2013. 1535 p.

2. *Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации*. Москва: Росгидромет; 2014. 1008 с.

3. Переведенцев ЮП, Шерстиков БГ, Наумов ЭП, Верещагин МА, Шанталинский КМ. *Климатические условия и ресурсы Республики Татарстан*. Казань: Издательство Казанского государственного университета; 2008. 288 с.
4. Perevedentsev YuP, Malkhazova SM, Aukhadееv TR, Shantalinsky KM. Medical and demographic consequences of climate change and the assessment of comfort level of weather-climatic conditions in the Volga Federal District. *Geography, environmental, sustainability*. 2016;9(4):63–76.
5. Global Historical Climatology Network-Monthly Version 3.2.0 [Internet; cited 2019 February 1]. Available from: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/land-based-station-data/land-based-datasets/global-historical-climatology-network-monthly-version-3>.
6. Smith TM, Reynolds RW, Peterson TC, Lawrimore J. Improvements to NOAA's historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880–2006). *Journal of Climate*. 2008;21(10):2283–2296. DOI: 10.1175/2007JCLI2100.
7. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST) v3b [Internet; cited 2019 February 1]. Available from: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/marineocean-data/extended-reconstructed-sea-surface-temperature-ersst-v3b>.
8. Xue Y, Smith TM, Reynolds RW. Interdecadal changes of 30-yr SST normals during 1871–2000. *Journal of Climate*. 2003; 16(10):1601–1612.
9. Переведенцев ЮП, Хабутдинов ЮГ, Гизатуллин РД, Алтухова АВ. Агрометеорологические условия Приволжского федерального округа. *Российский журнал прикладной экологии*. 2017;1:3–8.
10. Переведенцев ЮП, Шанталинский КМ, Важнова НА. Пространственно-временные изменения основных показателей температурно-влажностного режима в Приволжском федеральном округе. *Метеорология и гидрология*. 2014;4:32–48.
11. Багров АН. Сравнительная оценка успешности прогнозов элементов погоды на основе ряда отечественных и зарубежных моделей атмосферы различного масштаба. В: Веселова ГК, редактор. *Информационный сборник № 35. Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов*. Москва: ГМЦ РФ; 2008. с. 3–20.
12. Говоркова ВА, Капцов ВМ, Мелешко ВП, Павлова ТВ, Школьник ИМ. Климат России в XXI веке. Часть 2. Оценка пригодности моделей общей циркуляции атмосферы и океана СМIP3 для расчетов будущих изменений климата России. *Метеорология и гидрология*. 2008;8:5–19.

References

1. Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, et al., editors. *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press; 2013. 1535 p.
2. Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii [The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation]. Moscow: Rosgidromet; 2014. 1008 p. Russian.
3. Perevedentsev YuP, Sherstyukov BG, Naumov EP, Vereshchagin MA, Shantalinskii KM. *Klimaticheskie usloviya i resursy Respubliki Tatarstan* [Climatic conditions and resources of the Republic of Tatarstan]. Kazan: Izdatel'stvo Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta; 2008. 288 p. Russian.
4. Perevedentsev YuP, Malkhazova SM, Aukhadееv TR, Shantalinsky KM. Medical and demographic consequences of climate change and the assessment of comfort level of weather-climatic conditions in the Volga Federal District. *Geography, environmental, sustainability*. 2016;9(4):63–76.
5. Global Historical Climatology Network-Monthly Version 3.2.0 [Internet; cited 2019 February 1]. Available from: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/land-based-station-data/land-based-datasets/global-historical-climatology-network-monthly-version-3>.
6. Smith TM, Reynolds RW, Peterson TC, Lawrimore J. Improvements to NOAA's historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880–2006). *Journal of Climate*. 2008;21(10):2283–2296. DOI: 10.1175/2007JCLI2100.
7. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST) v3b [Internet; cited 2019 February 1]. Available from: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/marineocean-data/extended-reconstructed-sea-surface-temperature-ersst-v3b>.
8. Xue Y, Smith TM, Reynolds RW. Interdecadal changes of 30-yr SST normals during 1871–2000. *Journal of Climate*. 2003; 16(10):1601–1612.
9. Perevedentsev YuP, Khabutdinov YuG, Gizatullin RD, Altukhova AV. Agrometeorological conditions of the Volga Federal District. *Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii*. 2017;1:3–8. Russian.
10. Perevedentsev YuP, Shantalinskii KM, Vazhnova NA. [Spatio-temporal changes in the main indicators of temperature and humidity in the Volga Federal District]. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2014;4:32–48. Russian.
11. Bagrov AN. [Comparative evaluation of the success of weather forecasts based on a number of domestic and foreign atmospheric models of various sizes]. In: Veselova GK, editor. *Informatsionnyi sbornik № 35. Rezul'taty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologii, modelei i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov* [Information collection No. 35. Test results of new and improved technologies, models and methods of hydrometeorological forecasts]. Moscow: Hydrometcenter of Russia; 2008. p. 3–20. Russian.
12. Govorkova VA, Kattsov VM, Meleshko VP, Pavlova TV, Shkol'nik IM. [The climate of Russia in the XXI century. Part 2. Assessing the suitability of the CMIP3 atmospheric general circulation models for ocean calculations of future climate changes]. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2008;8:5–19. Russian.