

**МЕТЕОРОЛОГИЯ**

УДК 551.51

**В.А. Лобанов, Г.Г. Тошачова****МЕТОДИКА ОЦЕНКИ БУДУЩИХ РЕГИОНАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ  
(НА ПРИМЕРЕ КОСТРОМСКОЙ ОБЛАСТИ)**

Разработана методика выбора наиболее эффективной климатической модели для рассматриваемого региона. На основе сопоставления данных наблюдений за среднемесячной температурой воздуха и климатического моделирования за совместный период выбрана наиболее подходящая для данной территории модель института метеорологии Макса Планка (Германия), которая незначительно отличалась от наблюдаемых климатических норм (в 2°C зимой и менее 1°C в летние месяцы). Будущие оценки температурного режима осуществлялись по этой модели для трех основных климатических сценариев (RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5) до 2100 г. Для наиболее реалистичного климатического сценария RCP4.5 получено, что наибольший прирост температур до 4°C следует ожидать весной и на северо-востоке области, а наименьший – летом и всего на 1°C. Зимние температуры вначале ненамного повысятся (примерно на 1°C), затем настолько же понизятся и только в конце XXI в. ожидается их повышение сразу на 1–2°C.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** методика оценки, модели климата, данные наблюдений, будущие сценарные оценки температуры, Костромская область.

**V.A. Lobanov, G.G. Toschakova****METHOD OF ASSESSMENT OF FUTURE REGIONAL TEMPERATURE CONDITIONS (FOR  
EXAMPLE OF KOSTROMA REGION)**

A technique was developed to select the most effective climate model for the region. Based on the comparison of observations of average monthly air temperature and data of climate modeling for the joint period the most appropriate model for the area such as the Max Planck Institute for Meteorology (Germany) model has been chosen, which had the smallest difference from the observed climatic norms of 2°C in winter and less than 1° C in the summer months. Future evaluation of temperature carried out on this model for three main climate scenarios RCP2.6, RCP4.5 RCP8.5 and until 2100. For the most realistic climate scenario RCP4.5 found that the greatest increase in temperature to 4°C is expected in the spring and in the north-east region, and the lowest – in the summer and around 1°C. Winter temperatures will rise slightly at first (about 1°C), then how much will fall, and until the end of the 21st century are expected to sharply increase at 1–2 °C.

**K e y w o r d s:** method of assessment, climate models, observations, assessment of future scenarios of temperature, Kostroma region.

Существуют три основных метода прогнозирования или оценки будущего климата:

- сценарии изменений и математические модели климата [8];
- использование климатических палеоаналогов;
- использование установленных закономерностей во времени для экстраполяции.

В настоящее время наиболее распространенным является метод, основанный на сценариях будущих оценок парниковых газов и других радиационно-активных веществ, которые и вносят основной вклад в современное изменение климата. Они изменяют радиационное воздействие на планету и вызывают климатические изменения в очень длительных временных масштабах. В связи с тем, что используются сценарные оценки при моделировании возможного состояния будущего климата вместо термина «прогноз» или «предсказание», следует употреблять термин «перспективная оценка». Для совершенствования моделей климата и выбора наиболее эффективных из них в 1990 г.

был создан международный проект по сравнению моделей климата AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project), в рамках которого проводится целенаправленное сравнение глобальных моделей общей циркуляции атмосферы (Global Atmospheric General Circulation Models – AGCMs), разработанных различными группами исследователей в разных странах мира, как между собой, так и с данными наблюдений [1–3; 11]. Это дает возможность исследовать систематические погрешности в воспроизведении современного климата и оценить диапазон возможных его изменений, обусловленных различными воздействиями, например антропогенными.

В 2005–2006 гг. рабочая группа по совместным моделям между атмосферой и океаном (Working Group on Coupled Modelling – WGCM) в рамках AMIP начала обобщать результаты климатического моделирования ведущих научных центров по всему миру. Собранные в виде архивов результаты моделирования прошлого, настоящего и будущего климата позволили сформировать третью фазу проекта по сравнению взаимосвязанных моделей (Coupled Model Intercomparison Project – CMIP3). В частности, WGCM организовала эту деятельность для того, чтобы специалисты за пределами крупных центров по климатическому моделированию могли использовать их результаты для подготовки четвертого оценочного доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК или IPCC, 2007 г.).

В основном результаты моделирования предназначены для рабочей группы № 1 МГЭИК, деятельность которой направлена на изучение физических основ климатической системы (атмосферы, суши, океана и морских льдов) и выбор переменных, которые отражают компоненты этой системы и должны быть заархивированы. Эта коллекция результатов моделирования получила название «Мультимодельные наборы данных проекта CMIP3 Всемирной программы исследований климата» или «WCRP CMIP3 multi-model dataset». Она представляет собой всеобъемлющий архив большого набора данных по климату двадцатого и двадцать первого столетий и других экспериментов, что практически полностью изменяет способ анализа результатов климатического моделирования для исследователей, студентов и всех тех, кто интересуется проблемой современного изменения климата.

В настоящее время при формировании 5-го оценочного доклада МГЭИК (2013–2014 гг.) [10] были получены новые результаты моделирования, которые представлены уже в проекте CMIP5. CMIP5 [9; 12], по сравнению со CMIP3, включает в себя более полные модели и более широкий набор экспериментов, предусматривающих большее разнообразие научных проблем. Модели и эксперименты CMIP5, отличающиеся от предыдущих фаз более высоким пространственным разрешением, используют более богатый комплект полей вывода для архивирования. В проекте CMIP5 дана лучшая документация по моделям и условиям эксперимента и сформирована новая стратегия, которая делает результаты более доступными для исследователей. Так, если в проекте CMIP3 рассматривалось 12 экспериментов с моделями, то в CMIP5 таких экспериментов было 35, перечень которых дан в работе [13].

В проекте CMIP5 вместо известных сценариев SRES (B1, A1B, A2, соответствующих концентрации  $\text{CO}_2$  в 2100 г. в 540, 762 и 875 ppm), по сравнению с проектом CMIP3, представлены новые сценарии RCP (Representative Concentration Pathway) или РТК (репрезентативная траектория концентрации), связанные со стабилизацией общего антропогенного воздействия в 2100 г. также на разных уровнях: 2,6, 4,5, и 8,5 Вт/м<sup>2</sup>, и вместо концентрации  $\text{CO}_2$  в ppm в этих сценариях дан общий эффект воздействия («форсинг») в Вт/м<sup>2</sup>. И если в CMIP3 ансамблевые оценки определялись по 16 глобальным моделям общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), то в CMIP5 для обобщений использованы данные более чем 50 моделей, представленные более 20 научными коллективами разных исследовательских центров. По сравнению с моделями предыдущей фазы проекта CMIP3 модели CMIP5 характеризуются в среднем более высоким пространственным разрешением и рядом усовершенствований в описании климатических процессов. Как и в проекте CMIP3, в новом проекте CMIP5 изменения климата рассматриваются для начала (2011–2030 гг.), для середины (2041–2060 гг.) и конца (2080–2099 гг.) XXI в., средненные за 20 лет по отношению к базовому климатическому периоду 1980–1999 гг.

Целью настоящей работы являются разработка и апробация методики региональной оценки будущих климатических характеристик на примере оценки будущих среднемесячных температур воздуха до конца 21-го в. для Костромской области. Для этой цели решались две основные задачи: – выбор наиболее подходящей модели климата при сравнении данных наблюдений и моделирования за совместный период на отдельных метеостанциях Костромской области;

– определение будущих значений температур воздуха на основе наиболее эффективной модели климата и анализ будущего климата Костромской области.

Обобщенные оценки изменения температуры воздуха по отдельным Федеральным округам и крупным районам для всей территории России приведены на сайте ГГО по ансамблю моделей для трех основных сценариев СМIP5 [13]. На основе этих данных путем интерполяции можно получить приближенные оценки будущей температуры Костромской области за три будущих интервала времени (2011–2031, 2041–2060 и 2080–2099 гг.) за год и сезоны года. Так, для среднегодовой температуры получен рост от 1,4–1,6°C в первый интервал времени, в зависимости от сценария, до 2,4–6,5°C – в последнюю двадцатилетку XXI в. При этом наиболее существенно должна расти зимняя температура: от 1,6–1,8°C в первый интервал времени до 2,8–8,1°C в конце века, хотя ее оценки варьируют в зависимости от сценария: чем дальше в будущее, тем больше. Меньше всего должна расти летняя температура: от 1,3–1,4°C в первый интервал времени до 2,0–5,8°C в конце века также в зависимости от сценария. Рост весенних и осенних температур занимает промежуточное положение между ростом температур летом и зимой и составляет от 1,4–1,6°C в первый интервал времени до 2,3–6,2°C в конце столетия. По наиболее вероятному среднему сценарию (RCP4.5) рост зимней температуры в конце XXI в. ожидается на 4,7°C, а летней – на 3,1°C.

Для более точной оценки будущих температур на территории Костромской области были выбраны 4 метеостанции, находящиеся в разных частях области, и ближайшие узлы регулярной сетки размером ячейки 1×1°, в которых получены результаты климатического моделирования. Расположение метеостанций и узлов регулярной сетки показано на рис. 1, из которого следует, что разность между узлами сетки и станциями не превышает 40 км.

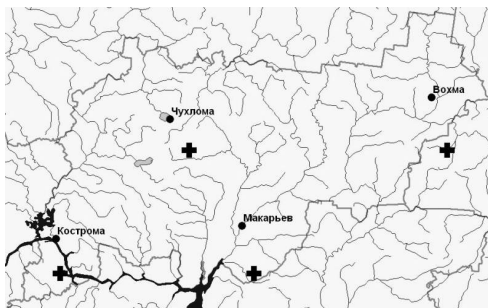


Рис. 1. Расположение метеостанций и ближайших узлов регулярной сетки климатического моделирования (крестики) на территории Костромской области

Для сопоставления с данными наблюдений за совместный период по сценарию «Исторический эксперимент», в котором данные моделировались с 1850 по 2005 г., выбраны следующие 5 климатических моделей:

- 1) CNRM – модель центра метеорологических национальных исследований, Франция (Meteo-France, Centre National de Recherches Meteorologiques, CM3 Model, CERFACS);
- 2) HadGEM2 – модель HadCM3 Хэдли центра прогноза климата, Великобритания (Hadley Centre for Climate Prediction, Met Office, UK, HadCM3 Model);
- 3) INM – модель института вычислительной математики РАН, Россия (Institute for Numerical Mathematics (INM)/Russia, INM-CM4);
- 4) IPSL – CM5A-MR - французская модель CM4 V1 Института Лапласа (Institute Pierre-Simon Laplace IPSL/LMD/LSCE, France);
- 5) MPI – модель института Макса Планка, Германия (Max Planck Institute for Meteorology, Germany, ECHAM5 / MPI OM).

Причем для модели CNRM данные моделирования имеются только начиная с 1950 г. Выбор моделей обусловлен, прежде всего, тем, что для каждой из них имеются результаты сценарных оценок до 2100 г. и по всем трем сценариям: RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5. Кроме того, в известном эксперименте по оценке глобальной температуры при удвоении CO<sub>2</sub> эти модели дали разные

величины роста температуры от 2,1°C (модель института вычислительной математики, Россия) до 4,4°C (модель Хэдли центра и французская модель CNRM).

Совместный период, для которого осуществлялось сравнение наблюдаемых и смоделированных значений среднемесячных температур воздуха, составлял 1937–2005 гг. для метеостанций Кострома и Вохма, 1925–2005 гг. – для метеостанции Чухлома и 1936–2005 гг. – для метеостанции Макарьев. При этом сопоставление данных осуществлялось как за весь совместный период наблюдений, так и за последовательные 30-летние интервалы, включая рекомендованный ВМО квазистационарный период 1961–1990 гг. В качестве меры сравнения применялись два показателя: разность климатических норм  $dt = t_m - t_{\text{набл}}$ , где  $t_m$ ,  $t_{\text{набл}}$  – соответственно средние многолетние температуры по модели и по данным наблюдений и  $R$  – коэффициент парной корреляции между наблюдаемыми и смоделированными температурами. Пример сравнения данных моделирования и наблюдений показан в табл. 1 для метеостанции Кострома. Ярким цветом выделены случаи наименьшей разности  $dt$  и коэффициентов корреляции  $R > 0,5$ .

Таблица 1

Результаты сравнения данных наблюдений и моделирования за совместный период по метеостанции Кострома (координаты станции (ш..д.): 57,78°, 40,93°, координаты узла сетки (ш..д.): 57,5°, 41°

Период	Модель									
	INM		HadGEM2		CNRM (с 1950 г.)		IPSL		MPI	
	dt	R	dt	R	dt	R	dt	R	dt	R
Январь										
1937-05	-5,0	0,01	-1,7	-0,07	-5,8	0,21	-2,9	-0,06	<b>-2,2</b>	-0,11
1937-66	-4,3	-0,01	0,8	0,18			-4,5	-0,17	<b>-2,2</b>	0,01
1967-96	-4,4	0,17	-3,4	-0,29	-4,6	0,25	-3,4	-0,11	<b>-1,9</b>	-0,32
1976-05	-7,7	0,28	-4,2	-0,19	-6,7	0,15	-4,6	0,28	<b>-3,0</b>	-0,26
1961-90	-4,9	0,00	-2,0	-0,28	-6,5	-0,05	-2,2	0,06	<b>-1,0</b>	-0,09
Февраль										
1937-05	-4,7	-0,18	-1,4	0,03	-3,5	-0,11	<b>0,6</b>	-0,15	<b>-0,9</b>	0,27
1937-66	-3,1	-0,23	-1,2	0,10			<b>-1,4</b>	-0,46	<b>-1,4</b>	0,22
1967-96	-5,1	-0,10	-3,4	0,20	-2,1	-0,30	<b>0,5</b>	0,07	<b>-0,7</b>	0,24
1976-05	-7,3	-0,01	-2,8	0,19	-2,1	-0,03	<b>0,6</b>	0,11	<b>-0,4</b>	0,27
1961-90	-4,6	-0,16	-2,1	0,20	-2,6	-0,10	<b>0,3</b>	0,01	<b>-0,4</b>	0,42
Март										
1937-05	-6,0	-0,07	-1,5	-0,20	-4,6	0,36	-1,5	-0,05	<b>0,3</b>	0,00
1937-66	-4,6	-0,15	1,6	-0,26			-2,8	-0,28	<b>-0,2</b>	-0,61
1967-96	-7,2	-0,05	-4,0	0,13	-4,2	0,38	-2,3	0,11	<b>0,4</b>	0,08
1976-05	-7,3	-0,08	-3,7	0,09	-4,8	0,26	-2,9	0,25	<b>1,0</b>	0,31
1961-90	-5,7	-0,20	-2,4	0,00	-5,3	0,66	-1,7	0,15	<b>-0,1</b>	-0,13
Апрель										
1937-05	-4,9	0,00	<b>-0,3</b>	-0,17	-4,9	0,31	-3,1	-0,38	<b>1,7</b>	0,07
1937-66	-3,2	0,04	<b>-2,2</b>	0,11			-3,1	-0,52	<b>2,6</b>	-0,07
1967-96	-6,2	0,25	<b>-2,0</b>	0,03	-4,4	0,36	-3,0	0,01	<b>1,1</b>	0,20
1976-05	-6,4	0,38	<b>-2,3</b>	-0,10	-4,9	0,17	-5,2	-0,16	<b>1,0</b>	0,30
1961-90	-4,8	0,06	<b>-0,7</b>	0,05	-4,8	0,14	-3,3	-0,05	<b>1,3</b>	0,16
Май										
1937-05	<b>-0,1</b>	0,33	2,0	0,08	-3,0	-0,06	0,7	0,13	<b>0,2</b>	-0,07
1937-66	<b>0,1</b>	0,43	2,4	-0,15			0,2	0,30	<b>0,3</b>	-0,28
1967-96	<b>0,1</b>	0,18	1,9	0,16	-2,0	0,01	0,7	-0,11	<b>-0,4</b>	-0,07
1976-05	<b>-0,3</b>	0,14	1,5	0,16	-3,5	-0,03	0,3	0,04	<b>-0,3</b>	0,23
1961-90	<b>0,1</b>	0,30	2,1	0,16	-3,2	-0,03	1,2	-0,01	<b>-0,5</b>	-0,04
Июнь										
1937-05	<b>0,4</b>	-0,16	1,2	-0,12	-0,2	0,11	2,1	-0,20	-1,2	0,06
1937-66	<b>1,1</b>	0,22	2,0	0,12			1,5	-0,06	-1,3	0,18
1967-96	<b>-0,1</b>	-0,40	0,9	-0,26	0,2	-0,02	2,0	-0,42	-1,1	0,04
1976-05	<b>-0,3</b>	-0,48	0,3	-0,37	-0,4	0,15	1,9	-0,35	-1,2	-0,12
1961-90	<b>0,5</b>	-0,47	1,6	-0,20	-0,4	0,06	2,4	-0,30	-0,5	0,06

Окончание табл. 1

Период	Модель									
	INM		HadGEM2		CNRM (с 1950 г.)		IPSL		MPI	
	dt	R	dt	R	dt	R	dt	R	dt	R
Июль										
1937-05	-2,4	-0,20	<b>0,5</b>	-0,23	1,9	-0,09	2,1	-0,33	<b>-0,8</b>	-0,05
1937-66	-2,1	-0,33	<b>0,9</b>	-0,44			1,4	-0,02	<b>-0,6</b>	-0,20
1967-96	-2,2	0,03	<b>1,0</b>	0,03	2,8	0,26	2,9	-0,07	<b>-0,6</b>	-0,08
1976-05	-2,7	-0,15	<b>0,1</b>	-0,03	1,3	-0,42	1,6	-0,40	<b>-0,9</b>	0,05
1961-90	-2,2	-0,06	<b>1,0</b>	-0,02	2,0	-0,06	2,9	-0,14	<b>-0,1</b>	-0,22
Август										
1937-05	-2,8	-0,06	<b>0,5</b>	0,07	2,3	-0,06	1,8	0,04	-1,1	-0,10
1937-66	-3,1	0,05	<b>0,3</b>	0,00			1,8	0,41	-1,9	0,01
1967-96	-3,2	-0,06	<b>1,0</b>	0,16	2,3	-0,05	2,6	-0,10	-0,4	-0,08
1976-05	-2,3	-0,08	<b>0,9</b>	0,08	2,4	-0,05	2,7	0,03	-0,2	-0,05
1961-90	-3,1	-0,03	<b>1,0</b>	0,09	2,2	-0,04	2,2	-0,07	-0,6	-0,07
Сентябрь										
1937-05	-2,5	-0,09	0,7	0,05	1,3	0,13	0,5	0,03	<b>-0,4</b>	-0,01
1937-66	-3,0	0,05	0,6	0,05			0,2	0,11	<b>-1,2</b>	0,06
1967-96	-2,0	-0,25	1,0	0,00	1,9	0,01	1,0	0,03	<b>0,2</b>	-0,13
1976-05	-2,0	-0,18	1,0	0,12	1,0	0,19	1,0	-0,07	<b>0,5</b>	0,00
1961-90	-1,9	-0,33	1,0	-0,01	1,9	0,33	1,1	0,04	<b>0,0</b>	-0,13
Октябрь										
1937-05	-2,3	0,00	0,5	0,16	0,1	-0,04	-1,3	-0,17	<b>0,0</b>	0,03
1937-66	-2,5	0,17	1,0	0,37			-0,7	-0,20	<b>-0,4</b>	0,08
1967-96	-1,7	-0,11	0,3	-0,05	0,4	0,11	-1,9	-0,11	<b>0,1</b>	-0,02
1976-05	-1,5	-0,21	0,4	0,15	-0,1	-0,04	-1,6	-0,15	<b>0,8</b>	0,00
1961-90	-2,8	0,05	0,2	-0,05	0,3	-0,21	-1,6	0,06	<b>-0,5</b>	0,01
Ноябрь										
1937-05	-1,9	0,16	-1,1	-0,06	-1,4	0,16	-0,1	-0,18	<b>-0,2</b>	-0,15
1937-66	-2,5	0,12	0,3	0,06			1,9	-0,35	<b>0,9</b>	-0,34
1967-96	-2,1	0,29	-2,6	-0,12	-2,5	0,20	-0,5	0,09	<b>-1,3</b>	0,03
1976-05	-1,4	0,17	-1,3	-0,03	-1,0	0,07	-1,8	-0,13	<b>-0,6</b>	0,00
1961-90	-2,0	0,24	-2,5	-0,12	-1,4	0,13	0,1	0,14	<b>-1,3</b>	-0,02
Декабрь										
1937-05	-3,7	0,15	-2,3	-0,06	-4,2	0,06	-1,8	-0,02	<b>-1,1</b>	-0,30
1937-66	-5,0	0,15	-1,5	-0,06			-1,6	-0,22	<b>-1,9</b>	-0,31
1967-96	-3,0	0,05	-1,8	-0,16	-5,5	0,11	-2,2	-0,09	<b>-0,3</b>	-0,38
1976-05	-3,0	0,13	-2,6	0,11	-3,1	-0,03	-2,3	0,24	<b>-1,7</b>	-0,39
1961-90	-3,1	0,11	-2,0	-0,09	-4,9	0,11	-2,6	-0,14	<b>0,1</b>	-0,29

Из табл. 1 следует, что не было ни одного случая с достаточно высоким положительным коэффициентом корреляции  $R > 0,5$ . Это свидетельствует о том, что климатические модели недостаточно эффективно воспроизводят естественную межгодовую изменчивость, поэтому их пока можно использовать только для получения климатических средних за период. При сравнении климатических норм в разные месяцы года всегда выделяется одна или максимум две наиболее эффективных модели с наименьшей разностью dt. Причем величина dt меняется от месяца к месяцу, также как и вид модели. Так, для температуры января наиболее эффективной является MPI-модель со средним  $dt = -2,1^{\circ}\text{C}$  и при вариации в зависимости от периода от  $-3,0^{\circ}\text{C}$  (1976–2005 гг.) до  $-1,0^{\circ}\text{C}$  (1961–90 гг.), но во всех случаях значение температуры по модели было систематически ниже фактической. При сравнении по другим моделям разности были существенно больше и достигали  $dt = -5^{\circ}\text{C} \dots -7^{\circ}\text{C}$ . В целом MPI-модель можно считать самой эффективной или одной из самых эффективных для 10 из 12 месяцев (за исключением июня и августа) и в месяцы теплого периода года с марта по октябрь dt меньше, знакоперемненны и в большинстве случаев не превышают  $1^{\circ}\text{C}$ . В некоторые месяцы практически такими же эффективными являются и другие модели наравне с MPI-моделью. Так, для февраля подходит также и IPSL-модель, для апреля – HadGEM2-модель, для мая – INM-модель и для июля – HadGEM2-модель. Лучшие результаты (в два месяца) дают другие модели:

в июне это INM-модель, а в августе – HadGEM2-модель. Хотя сами погрешности по обеим моделям отличаются менее, чем на 1 градус и по MPI-модели не превышают 2,0°C. Поэтому можно сделать вывод, что по метеостанции Кострома во все месяцы года наиболее подходящей является MPI-модель.

Этот же вывод подтверждается и рис. 2, на котором приведены наблюдаемые нормы среднемесячных температур и аналогичных температур, полученных по климатическим моделям в рамках исторического эксперимента. При этом распределения даны как для всего совместного периода с 1937 по 2005 г., так и для периода, рекомендованного ВМО с 1961 по 1990 г.

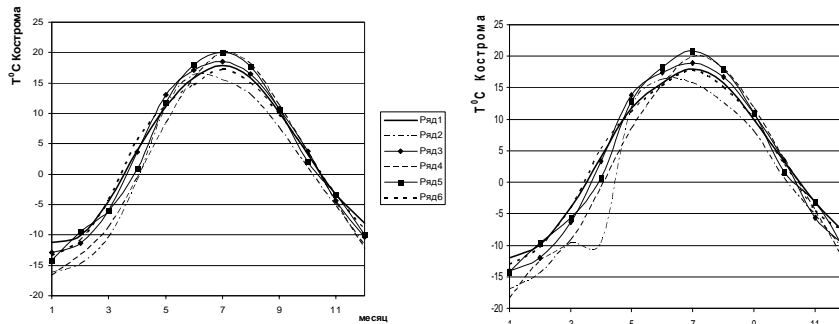


Рис. 2. Внутригодовые распределения фактических и смоделированных температур за периоды 1937-2005 гг. (левый график) и 1961-1990 гг. (правый график): яркая черная линия – данные наблюдений (ряд 1); яркая пунктирная линия – полученные по MPI-модели (ряд 6) и остальные линии – другие модели (ряд 2 – INM-модель, ряд 3 – HadGEM2-модель, ряд 4 – CNRM-модель, ряд 5 – IPSL-модель)

Вычисленное среднее квадратическое отклонение разностей между наблюдаемыми и смоделированными значениями для MPI-модели является наименьшим и составляет соответственно 0,9°C и 0,6°C за весь период и период, рекомендованный ВМО.

Аналогичным образом было проведено сравнение наблюдаемых и фактических норм и для остальных трех метеостанций. В подавляющем большинстве случаев для этих метеостанций MPI-модель также дает наименьшие отклонения между климатическими нормами, полученными по данным наблюдений и моделирования за разные периоды времени и разные месяцы года. Коэффициенты же корреляции между наблюдаемыми и смоделированными рядами во всех случаях были низкими. В табл. 2 приведены  $dt$  для MPI-модели за разные месяцы и разные периоды года для трех остальных метеостанций.

Таблица 2

Отклонения  $dt$  в °C между нормами температур, полученными по данным наблюдений и моделирования по MPI-модели для метеостанций Вохма, Макарьев и Чухлома

Период	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Метеостанция Вохма												
1937-65	-0,9	0,0	1,2	1,8	0,3	-0,8	-0,2	-0,1	0,5	0,4	0,5	0,3
1937-66	-0,7	0,2	1,8	2,4	0,8	-1,2	-0,2	-1,0	0,3	0,5	1,3	0,0
1967-96	-0,5	-0,3	0,2	1,4	0,1	-0,9	0,9	0,6	1,0	0,5	-0,3	1,4
1976-05	-1,5	-0,3	1,5	1,2	-0,1	-0,7	-0,4	0,9	1,2	0,5	0,3	0,3
1961-90	-1,0	0,1	-0,5	1,3	-0,7	-0,4	0,0	-0,2	0,6	0,3	-0,2	1,3
Метеостанция Макарьев												
1936-05	-2,3	-0,4	0,1	0,8	-0,3	-1,6	-0,9	-0,9	-0,4	-0,1	-0,7	-1,3
1936-65	-2,3	-0,6	0,5	4,7	-0,8	-2,3	-1,6	-2,1	-1,5	-0,2	0,0	-1,6
1965-94	-1,0	-0,4	-0,5	0,0	-0,1	-0,8	0,2	-0,1	0,4	-0,4	-1,6	-0,3
1976-05	-3,6	-0,3	0,5	0,2	-0,6	-1,3	-0,7	0,4	0,7	0,6	-0,6	-2,5
1961-90	-1,6	-0,4	-0,7	0,5	-0,2	-0,8	0,3	-0,3	0,3	-0,4	-1,9	-0,4

Окончание табл.2

Период	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Метеостанция Чухлома												
1925-05	-1,3	-0,4	-0,4	1,5	0,3	-0,5	-0,5	-0,7	-0,3	-0,3	-0,5	-0,6
1925-54	0,3	1,5	0,1	2,2	1,3	-0,4	-1,2	-0,9	-0,4	-0,2	-1,2	-1,8
1954-83	-1,9	-1,6	-1,2	2,1	-0,2	-0,3	0,1	-0,9	-0,8	-0,3	0,1	-0,6
1976-05	-2,2	-1,4	-0,3	0,6	-0,6	-0,7	-0,3	0,0	0,2	-0,6	-1,2	0,0
1961-90	-1,6	-1,8	-1,7	1,1	-0,9	-0,5	0,2	-1,0	-0,3	0,0	-0,4	-0,5

Из табл. 2 следует, что зимой модельные данные обычно систематически ниже, чем наблюдаемые, и в зимние месяцы, особенно в январе, разность климатических норм  $\Delta t$  является наибольшей и может достигать 2–3°C. В летние же месяцы отклонения  $\Delta t$  незначительны и, как правило, не превышают 1°C. В целом же за все месяцы года и за разные периоды средние квадратические отклонения  $\Delta t$  составляют 0,7–1,1°C – для метеостанции Вохма, 0,5–1,3°C – для метеостанции Макарьев и 0,7–1,2°C – для метеостанции Чухлома. Если оценивать климатические нормы по другим моделям, то стандартная погрешность сразу же существенно вырастет. Так, при использовании INM-модели для метеостанции Кострома средняя квадратическая погрешность возрастет более, чем в 2 раза и составляет 1,8–2,8°C.

В результате проведенных исследований для оценки будущего климата Костромской области наиболее эффективной оказалась немецкая MPI-модель института Макса Планка со стандартной погрешностью 2°C зимой и менее 1°C летом. На основе этой климатической модели была дана оценка будущего климата Костромской области на три последующие 30-летних периода времени до конца XXI в.: 2011–2040 гг., 2041–2070 гг. и 2071–2100 гг. Оценка производилась по трем основным сценариям: RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5 по отношению к норме 1976–2005 гг. Полученные будущие климатические нормы температур в °C и в виде разностей по отношению к норме за период 1976–2005 гг. по разным сценариям для метеостанции Кострома приведены в табл. 3. Цифрами в табл. 3 обозначены следующие будущие 30-летние периоды: 1 – 2011–2040 гг., 2 – 2041–2070 гг. и 3 – 2071–2100 гг.

Таблица 3

Сценарные оценки норм температур воздуха на метеостанции Кострома до конца XXI в. в °C

Месяц	Сценарий, период								
	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Климатические нормы									
1	-10,1	-9,6	-8,8	-9	-9,6	-7,5	-9,8	-8,5	-3,8
2	-7,8	-7	-7,2	-6	-7,2	-5,3	-7,4	-4,8	-3,3
3	-1,4	-0,5	0	-0,9	-0,7	0,3	-0,6	0,8	2,6
4	7,7	7,3	7,2	7	6,7	7,7	6,9	8,3	9,9
5	13,4	12,7	12,7	12,3	13,2	13,6	13,4	14	15,4
6	16,6	17,2	16,1	16,5	16,9	17,6	16,8	17,2	19,5
7	18,8	18,9	18	17,7	18,6	18,9	18,5	19,2	20,6
8	16,8	17	15,9	16,6	17,5	17,2	16,3	18	19,3
9	12,3	12	11,5	12	12,7	12,6	12	13,7	14,8
10	6,2	5,9	5,9	5,9	6,6	6,2	5,8	7,7	9,7
11	-1,2	-0,5	-0,4	0,1	-0,9	-0,4	-1,1	0,6	2,7
12	-6,3	-6,7	-6	-7,2	-6,5	-5,6	-6,2	-5,2	-3
По отношению к норме за период 1976–2005 гг.									
1	-0,2	0,3	1,1	0,9	0,3	2,4	0,1	1,4	6,1
2	1,2	2	1,8	3	1,8	3,7	1,6	4,2	6,7
3	1,8	2,7	3,2	2,3	2,8	3,5	2,6	4	5,8
4	3,1	2,7	2,6	2,4	2,1	3,1	2,3	3,7	5,3
5	1,8	1,1	1,1	0,7	1,6	2	1,8	2,4	3,8
6	0,6	1,2	0,1	0,5	0,9	1,6	0,8	1,2	3,5
7	0,6	0,7	-0,2	-0,5	0,4	0,7	0,3	1	2,4
8	1,2	1,4	0,3	1	1,9	1,6	0,7	2,4	3,7
9	2,3	2	1,5	2	2,7	2,6	2,0	3,7	4,8

Окончание табл. 3

Месяц	Сценарий, период								
	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
10	2,9	2,6	2,6	2,6	3,3	2,9	2,5	4,4	6,4
11	2,2	2,9	3	3,5	2,5	3	2,3	4,0	6,1
12	1,7	1,3	2	0,8	1,5	2,4	1,8	2,8	5

В качестве примера на рис. 3 показаны многолетние ряды температуры января, апреля, июля и октября на метеостанции Кострома с 1937 г. по 2014 г., а также значения норм за периоды наблюдений и сценарных норм за будущие периоды до конца XXI в. на основе трех основных сценариев по МРІ-модели института Макса Планка (Германия).

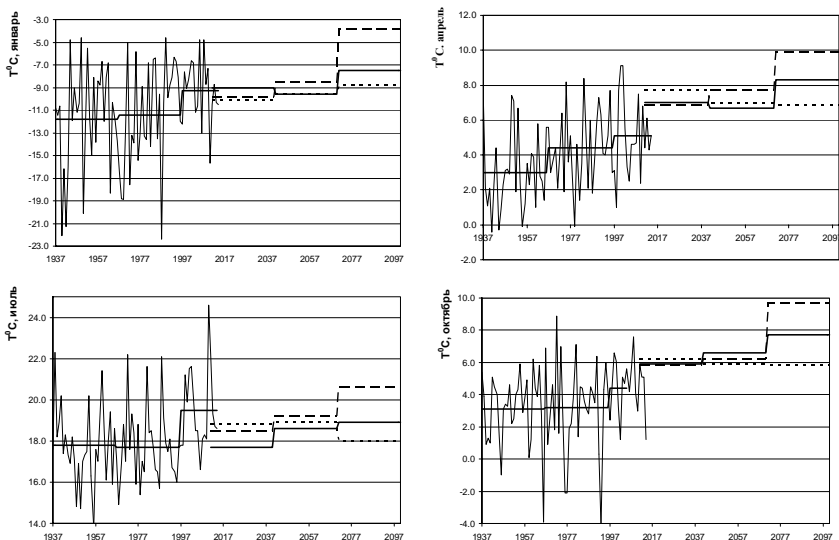


Рис. 3. Многолетние ряды температуры января, апреля, июля и октября на метеостанции Кострома и климатические нормы по данным наблюдений и сценарных оценок до конца XXI в. (климатическая модель института Макса Планка): сплошная линия – сценарий RCP4.5; пунктирная – RCP8.5; точечная – RCP2.6)

На рис. 3 будущие климатические нормы по среднему сценарию RCP4.5, как и по данным наблюдений, показаны сплошной линией. В целом же можно сделать вывод, что климатическая норма января за последние 30 лет наблюдений (1985–2014 гг.) равна  $-9,6^{\circ}\text{C}$ , а ожидаемые климатические нормы на последующие три 30-летних периода начиная с 2011 г. по наиболее реалистическому сценарию RCP4.5 будут составлять  $-9,0^{\circ}\text{C}$ ,  $-9,6^{\circ}\text{C}$  и  $-7,5^{\circ}\text{C}$  соответственно. Поэтом до 2071 г. климатическая норма января практически не изменится и только в последней трети XXI-го в. следует ожидать ее рост примерно на  $2^{\circ}\text{C}$ . По самому неблагоприятному сценарию RCP8.5 климатические нормы до последней трети XXI в. также практически не увеличатся, а резкое повышение почти на  $5^{\circ}\text{C}$  ожидается также только в конце века. Кроме того, естественная изменчивость температуры января очень большая при размахе колебаний в  $17^{\circ}\text{C}$  и при среднем квадратическом отклонении  $2,3^{\circ}\text{C}$ .

Для весенней температуры на примере апреля предполагается рост нормы уже в первой трети XXI в. с 2011 г. сразу на  $2\text{--}3^{\circ}\text{C}$ . Хотя наблюдаемый прирост нормы за последних два тридцатилетних периода (1955–1984 гг. и 1985–2014 гг.) составил всего около  $1,5^{\circ}\text{C}$ . В последней трети XXI в. весной ожидается дальнейшее увеличение нормы еще на  $1,5^{\circ}\text{C}$  по RCP4.5 и на  $2,2^{\circ}\text{C}$  по RCP8.5.



Естественная стандартная многолетняя изменчивость температуры в апреле также высокая и составляет 2,3°C при размахе около 10°C.

В июле стандарт естественной изменчивости несколько ниже и составляет 2,0°C при размахе колебаний около 11°C. Если вместо аномально большого среднего за последние 18 лет в 19,5°C (1997–2014 гг.) рассматривать норму за последний 30-летний период (1985–2014 гг.), равную 18,7°C, то последующие нормы отдельных 30-леток XXI в. практически мало будут от нее отличаться. При этом в первый период с 2011 по 2040 г. ожидается даже небольшое уменьшение нормы примерно на 1°C по среднему сценарию RCP4.5, а затем небольшой рост примерно на 0,5°C по сравнению с последним 30-летним периодом наблюдений. Поэтому можно считать, что климатическая норма летних температур практически не изменится в течение XXI в.

Норма осенних температур (октябрь) в последний 30-летний период (1985–2014 гг.) составляла 4,0°C (при изменчивости за весь период наблюдений в 2,4°C при размахе в 13°C) и превышала предыдущие нормы с 1937 г. примерно на 1°C. Практически по всем сценариям в первой трети века (2011–2040 гг.) норма должна вырасти еще на 2°C и составлять 5,8–6,2°C, затем практически остается неизменной и только по сценарию RCP4.5 растет до 6,6°C, но зато в последней трети века увеличивается по среднему сценарию до 7,7°C, а по наиболее неблагоприятному RCP8.5 – до 9,7°C. Поэтому повышение осенней нормы ожидается уже скоро на 2°C, а к концу века – почти на 4°C по среднему сценарию и почти на 6°C по неблагоприятному.

Поэтому можно сделать вывод, что наибольший рост температурных норм по сценариям ожидается в весенний и осенний периоды (в среднем на 3°–4°C), наименьший – летом (на 1,5°C) и зимой – примерно на 2°C, но в последней трети века. Об этом же свидетельствуют и данные наблюдений с 1937 г., на основании которых за весь период наблюдений 30-летняя климатическая норма выросла 1,5°C зимой, более чем на 2°C весной и всего на 1,0°C летом и осенью. Единственно, что мало обосновано данными наблюдений, – это ближайший предполагаемый рост весенних и осенних температур сразу на 2–3°C.

Аналогичные расчеты по климатическим сценариям выполнены и для трех остальных метеостанций, и результаты для характерных месяцев года по отношению к норме за период 1976–2005 гг. приведены в табл. 4. Как следует из табл. 4, для остальных трех метеостанций Костромской области получены практически такие же результаты, как и для метеостанции Кострома: небольшие изменения по сценариям RCP2.6 и RCP4.5 особенно до 2070 г. и большие увеличения температур до dt =6–7°C по сценарию RCP8.5 в последней трети XXI века.

Таблица 4  
Сценарные оценки изменения норм температур воздуха на реперных метеостанциях Костромской области до конца XXI в. в °C.

Месяц	Сценарий, период								
	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Метеостанция Вохма									
1	1,4	1,5	1,9	1,7	1,2	3,4	1,1	2,6	6,9
4	3,5	3,3	3,6	3,1	2,9	3,9	2,8	4,3	6,1
7	0,9	1,1	0,3	-0,1	0,8	1,1	0,6	1,5	3,1
10	3,2	2,6	3	2,5	3,5	2,9	2,6	4,5	6,8
Метеостанция Макарьев									
1	-0,3	0,1	-0,3	0,4	-0,1	2	-0,9	1,1	5,6
4	3,1	3	3	2,8	2,4	3,5	2,5	4	5,8
7									
	1	1,1	0,4	0	0,9	1,3	0,7	1,6	3,2
10	3,2	2,8	3	2,8	3,6	3,1	2,7	4,7	6,8
Метеостанция Чухлома									
1	0,5	0,9	1,6	1,4	0,8	2,9	0,8	2	6,6
4	3	2,9	3	2,6	2,5	3,5	3,5	3,9	5,6
7	0,8	1	0,1	-0,3	0,6	0,9	0,5	1,2	2,7
10	2,5	2,1	2,3	2,1	2,9	2,4	2,1	3,1	6

Для пространственного сопоставления ожидаемых климатических изменений в характерные месяцы года по наиболее реалистическому сценарию RCP4.5 на рис. 4 приведены климатические нормы по всем четырем метеостанциям за три 30-летних периода XXI века. При этом метеостанция

Вохма отражает самую холодную северо-восточную часть области, Кострома – самую теплую – юго-западную часть территории, Макарьев – центр, а Чухлома – северо-запад.

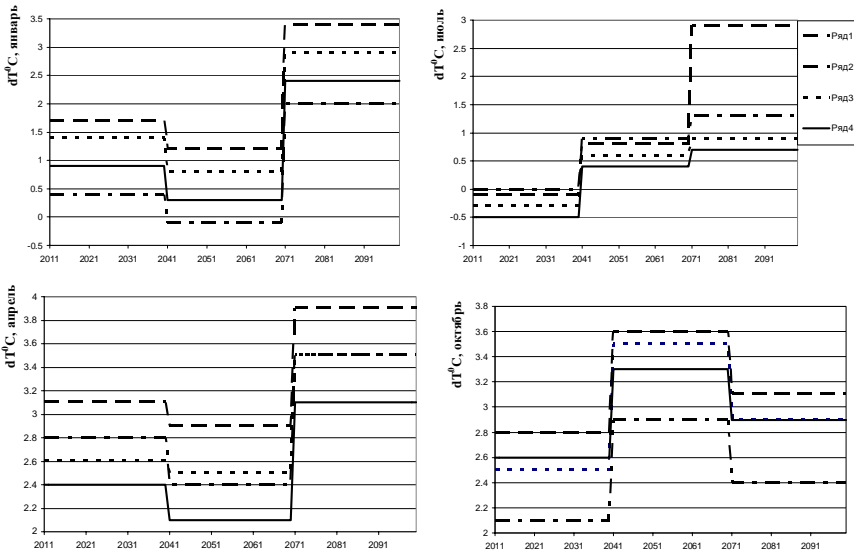


Рис. 4. Изменение будущих климатических норм ( $dt^{\circ}C$ ) характерных сезонных месяцев по сценарию RCP4.5 по отношению к норме за период 1976–2005 гг.: пунктир – ряд 1 – Вохма; штрих-пунктир – ряд 2 – Макарьев; точки – ряд 3 – Чухлома; сплошная – ряд 4 – Кострома

Из анализа будущих климатических норм следует, что наибольших изменений следует ожидать в апреле (почти до  $dt = 4^{\circ}C$  на метеостанции Вохма), а наименьших – в июле. Причем в июле рост температур даже в конце XXI в. составит всего около  $1^{\circ}C$  за исключением метеостанции Вохма, где предполагается, что  $dt$  резко возрастет с  $dt = 1^{\circ}C$  до  $dt = 3^{\circ}C$ , что маловероятно. Январские температуры ожидают рост в ближайшие 30 лет от  $dt = 0,4^{\circ}C$  (Макарьев) до  $dt = 1,7^{\circ}C$  (Вохма), затем падение от  $dt = -0,1^{\circ}C$  (Макарьев) до  $dt = 1,2^{\circ}C$  (Вохма) и затем снова рост от  $dt = 2,4^{\circ}C$  (Макарьев, Кострома) до  $dt = 3,4^{\circ}C$  (Вохма). Поэтому зимой наибольший рост температур ожидается на северо-востоке, а наименьший – на юге области. Наибольший рост ожидается весной также на северо-востоке до  $dt = 3,9^{\circ}C$  (Вохма), причем в середине XXI в. ожидается даже некоторое падение  $dt$  до  $2,1^{\circ}C$  (Кострома) и до  $dt = 2,9^{\circ}C$  (Вохма). Осенью, наоборот, наибольший рост температур ожидается в середине 21-го столетия от  $dt = 2,9^{\circ}C$  (Макарьев) до  $dt = 3,6^{\circ}C$  (Вохма), а затем к концу века падение по отношению к середине столетия примерно на  $0,5^{\circ}C$ .

Для подтверждения начавшегося роста апрельских температур воздуха на рис. 5 приведены графики наблюдаемой температуры этого месяца с начала наблюдений до 2014 г. для каждой из 4 рассматриваемых метеостанций.

Даже визуальный анализ графиков позволяет сделать вывод, что норма температур апреля в течение всего периода наблюдений ступенчато повышалась, что соответствует наиболее распространенному виду модели климатических изменений [4–7]. Если же выбрать 2–3 квазистационарных периода, то это повышение нормы составляет:  $dt = 2,5^{\circ}C$  на метеостанции Кострома,  $dt = 1,7^{\circ}C$  на метеостанции Вохма,  $dt = 1,1^{\circ}C$  на метеостанции Макарьев и  $dt = 2,1^{\circ}C$  на метеостанции Чухлома. Хотя на метеостанции Вохма за весь период наблюдений подъем температур и не столь большой, но эти изменения относятся к последнему периоду. В то же время на метеостанции Кострома за последний период  $dt$  – всего около  $1^{\circ}C$ . Поэтому вполне можно ожидать

большого прироста температур в ближайшее время именно в северо-восточной части области по отношению к южной, что как раз позволяет оценить климатические сценарии.

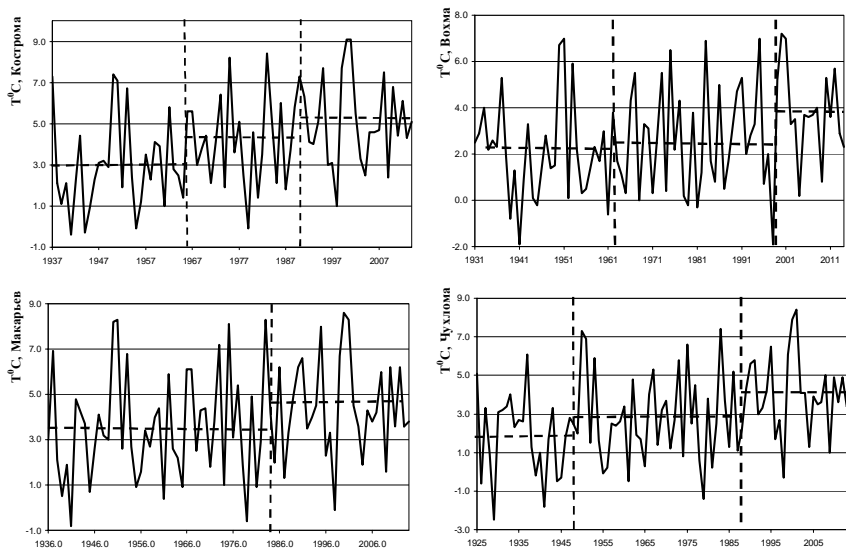


Рис. 5. Климатические изменения среднемесячной температуры апреля по данным наблюдений на четырех реперных метеостанциях Костромской области

Для оценки будущих температур на остальных метеостанциях Костромской области была рассчитана пространственная связанность смоделированных рядов. В связи с тем, что территория Костромской области небольшая и имеет протяженность примерно 200 км с севера на юг и 400 км с запада на восток, то и коэффициенты парной корреляции будут достаточно высокими. Так, например, между наиболее удаленными на расстояние в 360 км метеостанциями Кострома и Вохма коэффициенты парной корреляции для смоделированных рядов по сценарию RCP4.5 составляют  $R = 0,9$  летом,  $R = 0,95$  весной и осенью и  $R = 0,97$  зимой, когда синоптические условия наиболее однородные. Для наиболее близких метеостанций Чухлома и Макарьев при расстоянии 120 км коэффициенты корреляции еще выше и равны:  $R = 0,99$  во все сезоны. Поэтому можно считать, что четыре выбранные метеостанции полностью характеризуют будущие климатические изменения в соответствующих частях Костромской области.

Таким образом, в результате исследований разработана и апробирована методика оценки будущего регионального климата и получены следующие результаты:

- выбрана наиболее подходящая климатическая модель метеорологического института Макса Планка (Гамбург, Германия), которая имеет наименьшие расхождения с климатическими нормами температуры по данным наблюдений за совместный период;
- на основании этой модели и наиболее реалистичного климатического сценария RCP4.5 получено, что наибольший прирост температур до  $4^{\circ}\text{C}$  следует ожидать весной и на северо-востоке области, а наименьший – летом и всего на  $1^{\circ}\text{C}$ . Зимние температуры вначале ненамного поднимутся (примерно на  $1^{\circ}\text{C}$ ), затем настолько же упадут и только в конце 21-го века ожидается их повышение сразу на  $1\text{--}2^{\circ}\text{C}$ ;
- данные наблюдений весенних температур также свидетельствуют о наибольшем ступенчатом росте и в последний период именно для северо-востока области.

**Библиографический список**

1. Дымников В.П., Лысков В.Н., Володин Е.М. Моделирование климата и его изменений. М.: Наука, 2006. 173 с.
2. Калинин Н.А., Кислов А.В., Бабина Е.Д., Ветров А.Л. Оценка качества воспроизведения моделью ММ5 температуры воздуха в июле на Урале // Метеорология и гидрология. 2010. №10. С. 15–22.
3. Калинин Н.А. Мониторинг, моделирование и прогноз состояния атмосферы в умеренных широтах / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2015. 308 с.
4. Лобанов В.А., Шадувский А.Е. Выделение зон климатического риска на территории России при современном изменении климата: монография. СПб.: РГГМУ, 2013. 123 с.
5. Лобанов В.А., Тоцакова Г.Г. Проявление современных изменений климата на территории Костромской области: монография / ФГБУ «Костромской центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». Кострома., 2013. 171 с.
6. Лобанов В.А., Шукри О.А. Оценка климатических изменений температуры воздуха и осадков на Аравийском полуострове // Учен. зап. РГГМУ. 2014. №37. С. 72–83.
7. Лобанов В.А., Кириллина К.С. Оценка современных климатических изменений температуры воздуха на территории республики Саха (Якутия) // Учен. зап. РГГМУ. 2015. №38. С.137–152.
8. Переведенцев Ю.П. Теория климата. Казань, 2009. 503 с.
9. About the WCRP CMIP5 Multi-Model Dataset Archive at PCMDI: URL: [http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about\\_ipcc.php](http://www.pcmdi.llnl.gov/ipcc/about_ipcc.php) (дата обращения: 01.12.2015).
10. *Climate Change*. The Physical Science Basis. Working Group I. Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, Sro Paolo, Delhi, Mexico City. 2013. 1552 p.
11. Gates W.L. AMIP: The Atmospheric Model Intercomparison Project. Bull. Amer. Meteor. Soc. 1992. Vol. 73. P. 1962–1970.
12. Karl E. Taylor, Ronald J. Stouffer, and Gerald A. Meehl. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design, Bull // American Meteorological Society. 2012. P. 485–498.
14. ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова». Изменения климата в России в 21-м веке (модели CMIP 5). URL: <http://voeikovmgo.ru/ru/izmenenie-klimata-v-rossii-v-xxi-veke?id=613> (дата обращения: 01.12.2015).

Поступила в редакцию 28.01.2016

**Сведения об авторах****Лобанов Владимир Алексеевич**

доктор технических наук, профессор кафедры метеорологии, климатологии и охраны атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета. (РГГМУ); Россия, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., д. 98; e-mail: lobanov@EL6309.spb.edu

**About the authors****Vladimir A. Lobanov**

Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Meteorology, Climatology and Air Protection (MKOA) Russian State Hydrometeorological University (RSHU) 98, Malookhtinsky Pr., St. Petersburg, 195196, Russia; e-mail: lobanov@EL6309.spb.edu

**Тоцакова Галина Геннадьевна**

начальник Костромского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ЦГМС); 156013, Кострома, ул. Калиновская, 38; e-mail: pogoda@kmtn.ru

**Galina G. Toschakova**

Head of the Kostroma «Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring» 38 Kalynovska Str., Kostroma, 156013, Russia; e-mail: pogoda@kmtn.ru

**Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:**

Лобанов В.А., Тоцакова Г.Г. Методика оценки будущих региональных температурных условий (на примере Костромской области) // Географический вестник. 2016. №1(36). С. 58–69.

**Please cite this article in English as:**

Lobanov V.A., Toschakova G.G. Method of assessment of future regional temperature conditions (for example of Kostroma region) // Geographicheskii Vestnik. 2016. №1(36). P. 58–69.