

Г.Г. Тошчакова

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ
КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ
ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА В КОСТРОМСКОЙ ОБЛАСТИ**

G.G. Toshchakova

**MODERN CLIMATE CHANGE TEMPERATURE
IN THE KOSTROMA REGION**

Проведены исследования климатических изменений температурного режима на территории Костромской области за весь период инструментальных наблюдений современными методами статистики.

Выявлен ступенчатый рост среднегодовой температуры воздуха связанный со ступенчатым ростом среднемесячных температур весенних месяцев начиная с 1988 г.

Ключевые слова: климатические изменения, температурный режим, ступенчатый рост температуры, среднегодовая температура, среднемесячная температура.

The researches of climatic changes in the temperature regime on the territory of the Kostroma region during the period of instrumental observations of modern methods of statistics. Revealed step growth of the average annual air temperature rise associated with a step by growth of average monthly temperatures in the spring months since 1988.

Key words: climate change, the temperature mode, step growth of temperature, average temperature, average temperature.

Проведенные в Росгидромете исследования показывают, что в настоящее время климатические условия на территории России существенно меняются. Вместе с тем, потепление на планете происходит неодинаково в разных регионах [2, 3]. Подобные выводы подтверждаются исследованиями ученых Российской академии наук, причем, если в целом по планете рост температуры воздуха составляет $+0,75^{\circ}$ за последние 100 лет, то для России, по данным ГГО им. А.И. Воейкова, он составляет $+1,29^{\circ}$, а в отдельных регионах, таких как Западная Сибирь и Забайкалье достигает $+1,5^{\circ}$ и $+1,65^{\circ}$, то есть региональные особенности изменений могут быть разными.

Чтобы выяснить проявляется ли глобальное потепление в конкретных природных характеристиках и на конкретной территории необходимо осуществить детальное исследование и моделирование динамики временных рядов. Поэтому целью настоящей работы является оценка климатических изменений одной из основных метеорологических характеристик – температуры воздуха на территории Костромской области.

Костромская область – один из крупнейших субъектов Российской Федерации, входящих в Центральный федеральный округ. Область расположена в центральной части Восточно-Европейской равнины. Граничит с Ивановской,

Ярославской, Вологодской, Кировской и Нижегородской областями. Территория области составляет 60,2 тыс. кв. км, на 74 % которых размещаются лесные угодья.

Само определение климата и расчетных климатических характеристик, предполагает условия стационарности, по крайней мере, за какой-либо интервал времени. Так в настоящее время определение климатических норм рекомендуется ВМО за период 1961–1990 гг. [5] за который средние значения допускаются стационарными. Поэтому стационарная модель является основополагающей для климатологии и все остальные виды моделей необходимо сравнивать и сопоставлять с ней. Модели временных рядов могут быть двух основных видов: простые однородные и композиционные [6].

На уровне рассмотрения простых моделей проявление изменений климата в многолетних временных рядах может быть двух основных видов:

- монотонные изменения в виде тренда,
- ступенчатые изменения, характеризующие переходы от одного стационарного состояния к другому.

Моделирование временных рядов включает три основные стадии:

- расчет параметров моделей;
- оценка эффективности нестационарных моделей по отношению к стационарной;
- оценка статистической значимости нестационарных моделей по отношению к стационарной.

Параметрами стационарной модели являются среднее значение (Y_{cp}) и среднеквадратическое отклонение (σ), определяемые по ряду наблюдений.

Модель ступенчатых изменений аналогична двум (или нескольким) стационарным моделям для двух (или нескольких) частей временного ряда, что характеризуется неизменностью во времени среднего значения и среднего квадратического отклонения для каждой части ряда:

$$Y_{1cp} = \text{const}1, Y_{2cp} = \text{const}1, \sigma_1 = \text{const}1, \sigma_2 = \text{const}2. \quad (1)$$

Момент ступенчатых изменений (t_n) определяется визуально или на основе дополнительной информации о факторе и дате нарушения стационарности (например, изменение индекса атмосферной циркуляции), а также может быть определен итерациями при достижении минимального значения суммы квадратов отклонений двух частей временного ряда:

$$SS = \sum_1^{n1} (Y_i - Y_{1cp})^2 + \sum_{n1+1}^n (Y_i - Y_{2cp})^2 = \min, \quad (2)$$

где $n1, n2$ – объемы каждой из двух частей временного ряда; SS – общая сумма квадратов отклонений.

Стандартное отклонение остатков ступенчатой модели для одной ступени и двух стационарных интервалов определяется по формуле

$$\sigma_{\text{ступ}} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 n_1 + \sigma_2^2 n_2}{(n_1 + n_2 - 1)}} \quad (3)$$

и для двух ступней и трех стационарных интервалов:

$$\sigma_{\text{ступ}} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 n_1 + \sigma_2^2 n_2 + \sigma_3^2 n_3}{(n_1 + n_2 + n_3 - 1)}}, \quad (4)$$

где $\sigma_{\text{ступ}}$ – стандартное отклонение остатков модели ступенчатых изменений; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – стандартные отклонения стационарных отрезков временного ряда; n_1, n_2, n_3 – объемы стационарных отрезков.

Модель линейного тренда выражается следующим уравнением:

$$Y(t) = b_1 t + b_0, \quad (5)$$

где t – время; b_1, b_0 – коэффициенты уравнения регрессии, определяемые методом наименьших квадратов (МНК):

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{\text{cp}})(t_i - t_{\text{cp}})}{\sum_{i=1}^n (t_i - t_{\text{cp}})^2}; \quad (6)$$

$$b_0 = Y_{\text{cp}} - b_1 t_{\text{cp}}. \quad (7)$$

Статистическая значимость модели линейного тренда оценивается по статистической значимости коэффициента b_1 или коэффициента корреляции R зависимости (1.7), который рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{\text{cp}})(t_i - t_{\text{cp}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{\text{cp}})^2 \sum_{i=1}^n (t_i - t_{\text{cp}})^2}}. \quad (8)$$

Статистическая значимость R определяется из условия $R \geq R^*$, где R^* – критическое значение коэффициента корреляции, определяемые при заданном числе степеней свободы (ν) и уровне значимости (α), где $\nu = n - 2$, n – объем ряда, $\alpha = 5\%$.

Для модели линейного тренда стандартное отклонение остатков вычисляется по формуле:

$$\sigma_{\varepsilon} = \sigma_y \sqrt{1 - R^2}, \quad (9)$$

где σ_y – стандартное отклонение исходного ряда (модель стационарного среднего); σ_{ε} – стандартное отклонение остатков относительно модели линейного тренда; R – коэффициент корреляции уравнения линейного тренда.

Для количественной оценки отличий модели тренда и модели ступенчатых изменений от модели стационарного среднего рассчитываются относительные погрешности по формулам:

$$\Delta_{\text{тр}} = \left(\frac{\bar{b}y - \bar{b}\bar{\varepsilon}}{\bar{b}y} \right) \cdot 100\%; \quad (10)$$

$$\Delta_{\text{ступ}} = \left(\frac{\sigma_y - \sigma_{\text{ступ}}}{\sigma_y} \right) \cdot 100\%, \quad (11)$$

где $\Delta_{\text{тр}}$, $\Delta_{\text{ступ}}$ – относительные погрешности или отличия (в %) модели тренда и модели ступенчатых изменений от модели стационарной выборки; σ_y , σ_ε , $\sigma_{\text{ступ}}$ – стандартные отклонения остатков соответственно моделей случайной выборки, линейного тренда и ступенчатых изменений.

Следующее теоретическое положение состоит в том насколько полученное преимущество той или иной модели относительно базовой (стационарной) является статистически значимым. Для оценки статистической значимости монотонных (трендовых) и ступенчатых изменений во временных рядах применяется критерий Фишера, количественно показывающий, насколько статистически значимо отличаются остаточные дисперсии выбранных моделей от дисперсии временного ряда (стационарной модели). Статистики критерия Фишера для каждой из двух конкурирующих моделей по отношению к модели стационарной выборки вычисляются по формулам:

$$F_{\text{ТР}} = \frac{\sigma^2_Y}{\sigma^2_\varepsilon}; \quad (12)$$

$$F_{\text{СТУП}} = \frac{\sigma^2_Y}{\sigma^2_{\text{ступ}}}. \quad (13)$$

В числителе всегда будет дисперсия исходного ряда наблюдений, т.к. она является наибольшей или, по крайней мере, равна остаточной дисперсии конкурирующей модели. В случае если расчетное значение статистики Фишера оказывается больше критического, то дисперсии двух моделей имеют статистически значимое различие и соответствующая модель (тренда или ступенчатых изменений) статистически эффективнее, чем модель стационарной выборки.

За основу формирования региональной базы данных по характеристикам термического режима на территории Костромской области приняты данные месячной дискретности: многолетние ряды среднемесячных температур воздуха, на основе которых были получены среднегодовые температуры. Многолетние ряды наблюдений за температурой воздуха на территории Костромской области выбраны на 14 метеостанциях с продолжительностью периода наблюдений от 60 до 90 лет.

Расположение метеостанций на территории области показано на рис. 1, из которого следует, что станции распределены по пространству достаточно равномерно и их число вполне достаточно для осуществления пространственных обобщений.

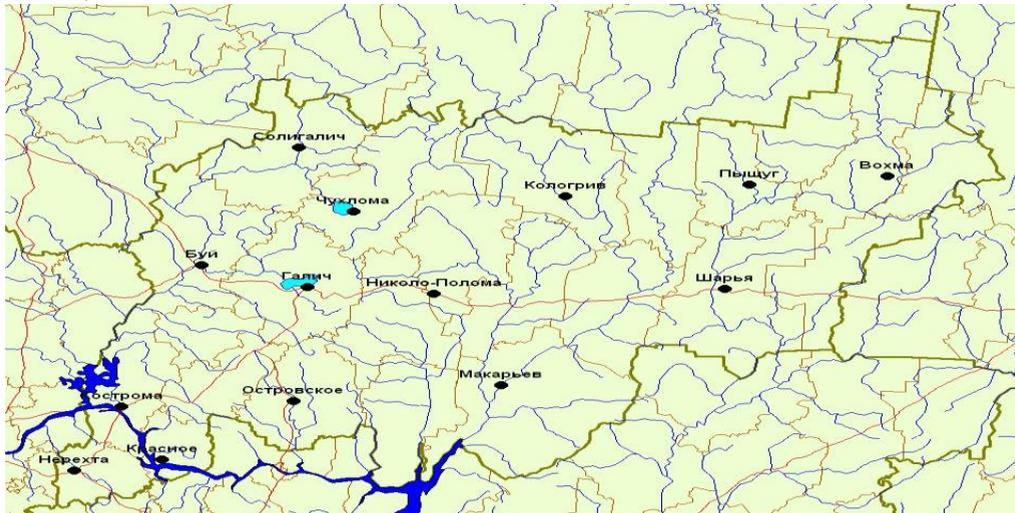


Рис. 1. Схема размещения пунктов наблюдений за температурой воздуха на территории Костромской области

Наблюдения по метеостанции Кострома являются наиболее продолжительными на территории рассматриваемого региона с началом регулярных наблюдений за температурой воздуха с 1842 г.

График среднегодовой температуры показан на рис. 2, из которого следует, что с конца 1980-х годов (с 1988 г.) наблюдается ступенчатое увеличение средней температуры примерно на $1,5^{\circ}\text{C}$.

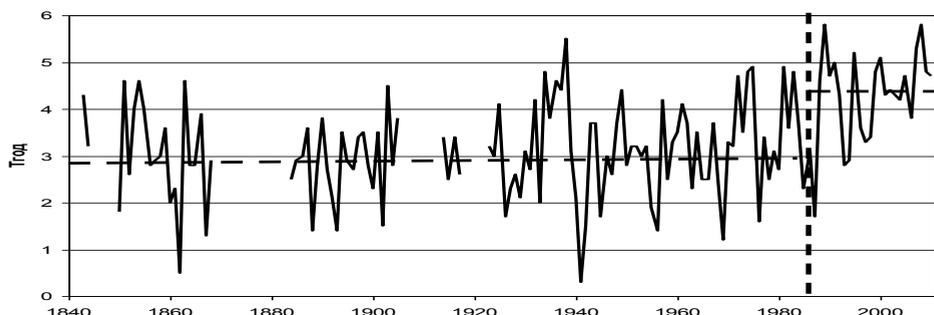
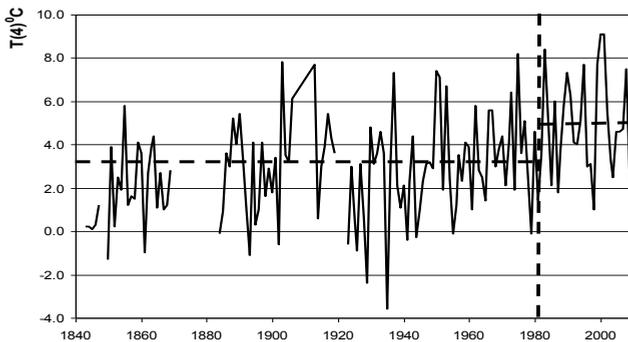
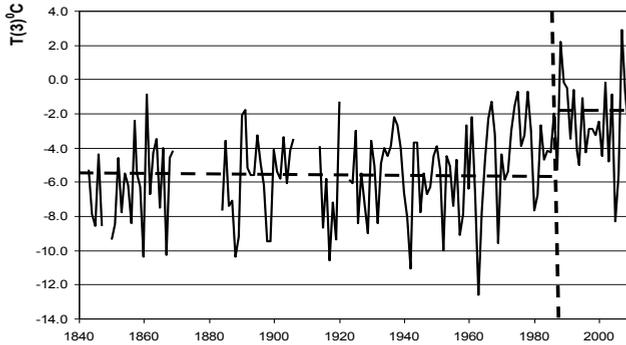
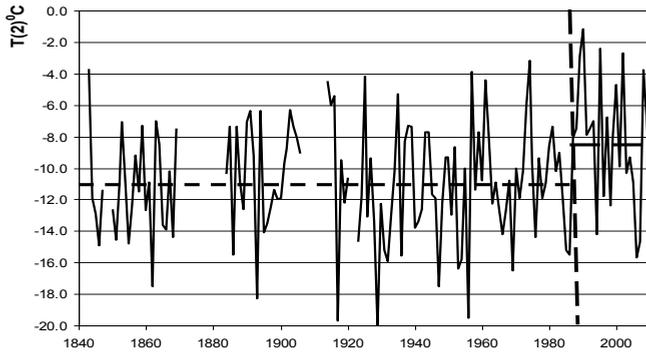


Рис. 2. Хронологический график среднегодовой температуры воздуха по метеостанции Кострома

Для того чтобы раскрыть причину резкого ступенчатого увеличения среднегодовой температуры, были проанализированы графики среднемесячных температур воздуха. Из всех 12 среднемесячных температур воздуха подобный

ступенчатый рост температуры был обнаружен только для трех месяцев: февраль, март и апрель, хронологические графики, для которых приведены на рис. 3. Причем, наибольшее ступенчатое увеличение температуры, составляющее около 4°C , наблюдается в марте, а в другие месяцы оно было около 2°C . В остальные месяцы года ряды температуры воздуха являются однородными и стационарными за некоторым исключением ряда среднемесячной температуры июля (рис. 3), в котором имеет место выдающийся максимум 2010 г., связанный с аномальными погодными условиями, вызванными продолжительным антициклоном и жаркой погодой.



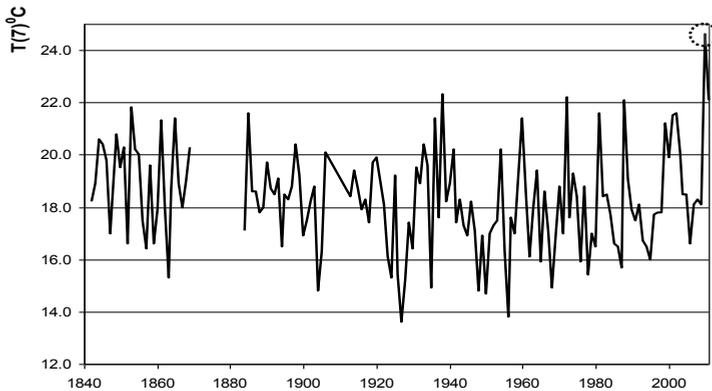


Рис. 3. Хронологические графики среднемесячных температур воздуха, включающие нестационарность и неоднородность

Количественная оценка предварительного анализа стационарности и однородности временных графиков приведена в табл. 1, в которой даны результаты сравнения нестационарных моделей временных рядов по отношению к стационарной для 20 исторических рядов различных характеристик температурного режима на метеостанции Кострома. По формулам (1)–(13) были определены параметры трех видов моделей временных рядов: стационарная выборка, линейный тренд и ступенчатые изменения, а также рассчитаны показатели их эффективности и статистической значимости. Результаты расчетов и оценки эффективности приведены в таблице, в которой: $\Delta_{тр}$, % $\Delta_{ст}$, % – эффективность моделей тренда и ступенчатых изменений по отношению к стационарной модели, %; $F_{тр}$, $F_{ст}$ – статистики критерия Фишера для оценки статистической значимости модели тренда и ступенчатых изменений по отношению к стационарной модели; $T_{ст}$, $T_{нач}$, $T_{кон}$ – годы ступенчатых изменений, начала и окончания наблюдений; n – продолжительность наблюдений, годы; R – коэффициент корреляции модели линейного тренда.

В таблице жирным шрифтом выделены отличия от стационарной модели, превышающие 10 %, статистически значимые отличия по критерию Фишера и статистически значимые коэффициенты линейного тренда. Основной вывод: статистически значимое отличие от стационарной модели можно идентифицировать для модели ступенчатых изменений и для трех температурных характеристик: средней температуры марта, среднегодовой температуры и коэффициента B_0 сезонной функции. Для этих случаев расчетные значения статистики Фишера равны 1,28–1,29, что близко к критическому значению, равному 1,28, при объеме выборки 136–144 лет и при уровне значимости $\alpha = 5\%$. В этих же трех случаях отличие от стационарной модели составляет более 10 %. По статистически значимым коэффициентам корреляции линейного тренда к нестационарным случаям можно отнести еще и среднемесячную температуру апреля и коэффициент B_1 сезонной функции.

**Характеристики моделей временных рядов характеристик температур воздуха
по метеостанции Кострома за исторический период**

Хар-ка	Δтр,%	Δст,%	Fтр	Fст	Tст	Tнач	Tкон	n	R
T(1)	1.1	3.5	1.02	1.07	1989	1843	2011	142	0.15
T(2)	1	3.2	1.02	1.07	1987	1843	2011	144	0.14
T(3)	7.9	11.9	1.18	1.29	1973	1843	2011	144	0.39
T(4)	8.5	8.6	1.2	1.2	1966	1843	2011	144	0.4
T(5)	0.7	1.8	1.01	1.04	1962	1843	2011	144	0.12
T(6)	0	2.8	1	1.06	1857	1843	2011	145	-0.02
T(7)	0.4	3.7	1.01	1.08	1999	1842	2011	148	-0.09
T(8)	0.2	4.8	1	1.1	1856	1842	2010	145	-0.06
T(9)	0	1.5	1	1.03	1854	1842	2010	146	-0.01
T(10)	0	1.5	1	1.03	1994	1842	2010	145	-0.02
T(11)	0.9	2.6	1.02	1.05	2000	1842	2010	145	0.13
T(12)	1.1	2.1	1.02	1.04	1935	1842	2010	144	0.15
Ср. год	5.4	11.6	1.12	1.28	1988	1843	2010	136	0.33
Летн. сез.	0.4	6.7	1.01	1.15	1856	1843	2010	142	-0.09
Зимн. сез.	2	4.4	1.04	1.09	1988	1843	2011	142	0.2
Макс. мес.	0.3	3.3	1.01	1.07	1999	1843	2010	142	-0.08
Мин. мес.	0.9	4	1.02	1.08	1988	1843	2010	137	0.13
V1	4.9	5.1	1.1	1.11	1973	1843	2010	139	-0.31
V0	6.4	11.8	1.14	1.29	1988	1843	2010	139	0.35
Se	0	0.7	1	1.02	1857	1843	2010	139	0.03

Проведенная оценка изменений климата в рядах характеристик термического режима для всех остальных станций на основе сопоставления стационарной модели с нестационарными позволила сделать вывод, что климатические изменения проявляются ступенчато (с увеличением температуры на 1,0–1,5 °С с конца 1980-х годов) для рядов среднегодовой температуры воздуха и среднемесячной температуры весеннего периода и только на метеостанциях северной части территории. Одной из причин ступенчатых изменений температурного режима могут быть особенности стратосферной циркуляции этого периода [5], что требует дальнейших исследований.

Литература

1. Бардин М.Ю. Изменчивость температуры воздуха над западными территориями России странами ближнего зарубежья в XX веке // Метеорол. и гидрол., 2002, № 8, с. 5–23.
2. Груза Г.В., Клещенко Л.К., Ранькова Э.Я. Об изменениях температуры воздуха и осадков на территории СССР за период инструментальных наблюдений // Метеорология и гидрология, 1977, № 1, с. 66–185.
3. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата // Метеорол. и гидрол., 2004, № 4, с. 50–66.
4. Махнорьлова С.В., Угрюмов А.И. Формирование длительных аномалий температурного режима весенне-летнего периода на Европейской территории России под влиянием особенностей стратосферной циркуляции // Уч. зап. РГГМУ, 2012, № 24, с. 38–53.
5. Lobanov V.A., Lobanova H.V. Trends in cold climate characteristics // Urban Drainage in specific Climates in Cold Climate. IHP-V, Technical Documents in Hydrology, N 40, Vol. II UNESCO, Paris, 2000, p. 171–199.
6. Lobanov V.A. Empirical-statistical methodology and methods for modelling and forecasting of climate variability of different temporal scale // Advances in Atmospheric Sciences. 2001, Science Press, Beijing, p. 844–863.