

УДК 551.524.3

АНАЛИЗ И ПРОГНОЗ ЗНАЧЕНИЙ СРЕДНЕГОДОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ КРЫМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Хаупшева М.Х., Шугунов Т.Л., Шугунов Л.Ж.

ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова»,
Нальчик, e-mail: Haupshewa@yandex.ru

В работе приведены результаты исследования режима температуры в республике Крым (г. Симферополь) по данным метеонаблюдений. Проведено исследование и анализ на основе разложения временного ряда значений температуры на основные составляющие: регулярную (тренд-циклическую) и случайную. Выделение циклической составляющей основано на преобразовании Фурье-ряда, но так как оно содержит все гармоники, то возникает необходимость выделения из них основных гармоник (скрытых периодов). Поиск основных гармоник осуществляется в областях максимума спектра, перебирая пробные гармоники, удовлетворяющие критериям случайностей остатка ряда, а также согласованием регулярной части ряда с результатами метода классической декомпозиции и метода фильтра 4253H. С использованием современных методов и средств компьютерных технологий составлены соответствующие программы и проведены расчеты. В результате такого анализа построена модель динамики среднегодовой температуры и проведено ее прогнозирование до 2035 года.

Ключевые слова: временной ряд, циклический тренд, метеопараметр, классическая декомпозиция, прогнозирование, асимметрия, автокорреляционная функция

THE ANALYSIS AND THE FORECAST OF VALUES OF AVERAGE ANNUAL TEMPERATURE OF THE CRIMEA WITH USE OF COMPUTER TECHNOLOGIES

Haupshewa M.Kh., Shugunov T.L., Shugunov L.Zh.

Kabardino-Balkarian state university of H.M. Berbekov, Nalchik, e-mail: Haupshewa@yandex.ru

In work results of a research of the mode of temperature are given in the Republic of Crimea (Simferopol) according to meteorological observations. The research and the analysis on the basis of decomposition of a temporary number of values of temperature on the main components is conducted: regular (a trend – cyclic) and accidental components. Allocation of a cyclic component is based on Fourier's transformation of a row, but as it contains all harmonicas, there is a need of allocation from them the main harmonicas (the hidden periods). Search of the main, harmonicas is performed in areas of a maximum of a range, touching the trial harmonicas meeting criteria of accidents of a remaining balance of a row and also coordination of a regular part of a row with results of a method of classical decomposition and a method of the filter 4253H. With use of modern methods and means of computer technologies, appropriate programs are constituted and calculations are carried out. As a result of such analysis, the model of dynamics of annual average temperature is constructed and forecasting till 2035 is carried out it.

Keywords: time row, cyclic trend, meteoroparameter, classical decomposition, forecasting, asymmetry, autocorrelated function

При исследовании изменений климата, с использованием данных многолетних наблюдений, возникает необходимость разложения временных рядов метеопараметров на основные составляющие. Если ряд не содержит сезонные компоненты, то задача сводится к разложению его на тренд, циклический тренд и случайную составляющие. К таким рядам относятся, например, многолетние ряды среднегодовых значений метеорологических параметров: среднегодовая температура, среднегодовое количество выпавших осадков и т.д. Анализ временных рядов посвящено много работ [1, 3, 4], в которых изложены основные методы обработки рядов, а программной реализации посвящена [2].

В данной работе проводится анализ и исследование временного ряда многолетних значений среднегодовой температуры в республике Крым (г. Симферополь). Сна-

чала проведен предварительный статистический анализ исследуемых временных рядов. В табл. 1 приведены результаты такого анализа.

Из данных табл. 1 следует, что асимметрия отрицательная и умеренная, эксцесс положительный – слабый, а размах температуры достигает около четырех градусов. Эти результаты осредненные и не позволяют оценить динамику температуры.

Проведена проверка значимости тенденции роста среднегодовой температуры в современный период по сравнению с климатической нормой по критерию Крамера-Уэлча. Использование этого критерия, а не критерия Стьюдента, связано с тем, что для последнего не выполнены условия применимости. По критерию Крамера-Уэлча ($\text{sig.} = 2,762 > 1,96$) тенденция роста температуры значима на уровне $p = 0,05$.

Таблица 1

Описательные статистики среднегодовой температуры Крыма

Пермен	Средн	Мин	Макс	Дисп	Стд. отк	Ст. ош	Асим	Эксц
Ср темп Симфер	10,826	8,747	12,753	0,7007	0,837	0,107	-0,506	0,105

Проведенный предварительный анализ свидетельствует о необходимости более глубокого анализа изменения среднегодовой температуры исследуемого региона.

Следуя методике [5], в работе проведено исследование, построена модель и вычислены прогнозные значения временного ряда среднегодовой температуры.

Результаты предварительного анализа показывают, что для описания временного ряда значений среднегодовой температуры его можно представить аддитивной моделью вида

$$Z_j(k) = m(t) + C_j(k) + \xi, k = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

где N – число членов ряда, $j = 1, 2$ – номер пункта наблюдения, $C_j(k)$ – циклический тренд, подлежащий определению, а ξ – случайная часть с нормальным законом распределения, с нулевым математическим ожиданием, k – номер ряда, $m(t)$ – линейный тренд, определяемый по формуле

$$m(t) = n + kt,$$

где коэффициенты n, k определяются методом наименьших квадратов.

После выделения полиномиального тренда ряд содержит только циклический тренд и нерегулярную часть.

Для выделения циклических составляющих временного ряда и программной реализации широко используется спектральный анализ рядов [2–4]. Однако, как известно, для использования результатов спектрального анализа для построения моделей прогнозирования, необходимо их дополнить различными критериями выбора основных периодов. Следуя [5], в данной работе в качестве дополнительных критериев используются критерии случайностей остатка ряда, а также критерии, основанные на согласовании полученных результатов с результатами широко известных методов сглаживания временных рядов.

В качестве критериев случайностей остатка ряда используются число поворотов точек, статистика Дарбина-Уотсона автокорреляционные функции и коэффициенты корреляции Пирсона. Критериями проверки циклического тренда выбраны метод классической декомпозиции и метод, основанный на использовании фильтра 4253Н.

Разлагая центрированный временной ряд значений метеопараметра в ряд Фурье, построены периодограмма и спектр ряда по известным формулам.

Периодограмма ряда определяется по формуле

$$S_j^2 = a_j^2 + b_j^2, j = 1, 2, \dots, g, \quad (2)$$

где a_j и b_j коэффициенты разложения Фурье ряда, определяемые по известным формулам:

$$a_j = \frac{2}{T} \sum_{t=1}^T y_t \cos \frac{2\pi}{T} jt, \quad (3)$$

$$b_j = \frac{2}{T} \sum_{t=1}^T y_t \sin \frac{2\pi}{T} jt, j = 1, 2, \dots, g \quad (4)$$

При четном T , к ним добавляется

$$a_{T/2} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T y_t (-1)^t.$$

В результате анализа получен линейный тренд ряда, определяемый по формуле

$$m(t) = 10,35 + 0,015 * t,$$

где t – время.

Отсюда следует, что наблюдается повышение среднегодовой температуры, что объясняется, по-видимому, антропогенными факторами и согласуется с теорией глобального потепления климата. Для выделения остальных составляющих временного ряда необходимо исключить линейный тренд из ряда. Тогда получим центрированный временной ряд, который можно рассматривать как стационарный и к нему можно применить спектральный анализ.

Так как периодограмма ряда является случайной, проводится ее сглаживание, используя спектральные окна, в частности, использовано окно Хемминга с шириной окна $m = 5$. Формула Хемминга определяется в виде

$$w_j = 0,54 + 0,46 * \cos(\pi * j/p) \text{ (для } j = 0 \text{ до } p),$$

$$w_j = w_j \text{ (для } j \neq 0).$$

Результаты такого анализа для временного ряда центрированных значений среднегодовой температуры, периодограммы гармоник и спектральная плотность приведены на рис. 1.

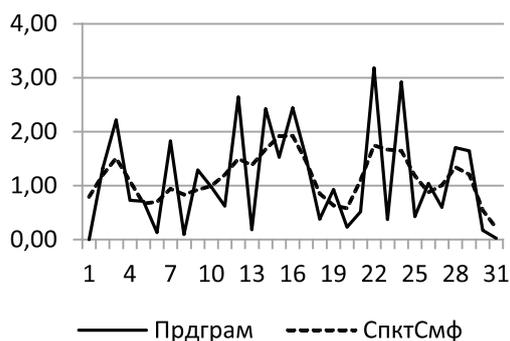


Рис. 1. Периодограмма и спектр среднегодовой температуры Крыма

Из графиков видно, что периодограмма имеет относительно большое число пиков, а спектр ряда – пять наиболее ярко выраженных максимумов, в области которых проводится поиск значимых гармоник.

Как известно, для оценки степени корреляции используется статистика Дарбина-Уотсона, определяемая по формуле

$$d = \sum_{i=1}^n (e_i - e_{i-1})^2 / \sum_{i=1}^n e_i^2, \quad (5)$$

где e_i – остаток ряда.

Составлены соответствующие программы на языке высокого уровня и проведены расче-

ты. По статистике (5) проведен анализ остатка ряда, последовательно включая в циклический тренд пробные гармоники, полученные по результатам спектрального анализа.

Одним из критериев адекватности модели является невязка, определяемая по формуле

$$\sum_{i=1}^q (Y_i - F_i(\omega))^2 = \min, \quad (6)$$

где Y_i, F_i – фактические и модельные значения ряда, соответственно.

Аналогичные исследования проведены и по другим критериям.

В табл. 2 приведены значения критериев для различных вариантов, по которым осуществляется выбор основных периодов.

Из данных таблицы следует, что по комплексу параметров наиболее подходит вариант 3 (3 строка), так как большинство критериев соответствует теоретическим значениям, немного уступая по некоторым критериям 4-му варианту (4 строка). Однако вариант 3 лучше по значениям АКФ (см. рис. 2), кроме того, в 4-м варианте отсутствует частота, соответствующая максимальному значению спектра. Поэтому выбирается 3-й вариант с периодами: 60, 10, 2,9 лет.

На рис. 2 приведены некоторые результаты такого анализа.

Таблица 2

Значения критериев случайностей остатка ряда температуры

Периоды (лет)	Критерий Дарбина-Уотсона		Число поворотных точек		Невязка (°С)	Коэффициенты корр. Пирсона		
	факт.	теор.	факт.	теор.		Фкт-прогноз	Дек-прогноз	4253Н-прогноз
60, 10, 4,6, 2,9	2,19	2	36	38,7	23,3	0,55	0,46	0,40
60, 10, 4,6	2,12	–	34	–	33,9	0,31	0,49	0,52
60, 10, 2,9	2,11	–	35	–	26,7	0,50	0,49	0,49
60, 10	2,17	–	36	–	31,6	0,37	0,68	0,73
10, 4,6, 2,9	2,21	–	36	–	44,7	0,16	0,37	0,38

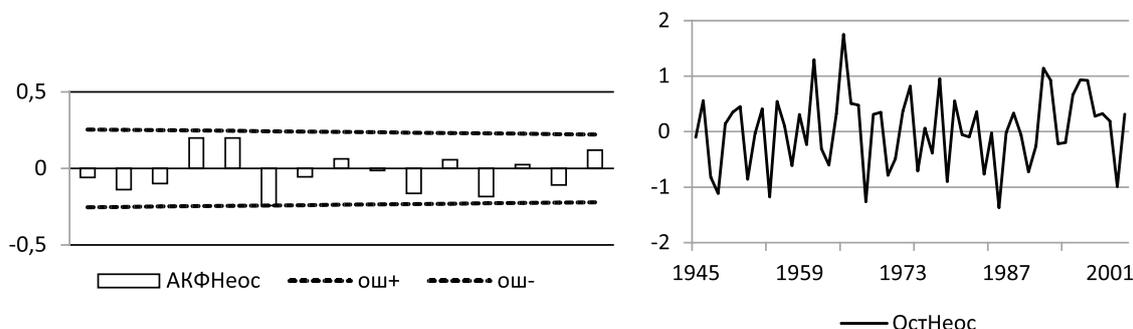


Рис. 2. АКФ остатков ряда (слева) и остатков ряда (справа)

Видно, что АКФ остатка ряда, полученного как разность фактических и модельных значений выбранного варианта, удовлетворяет условию случайности на уровне $p = 0,05$. По графику остатков ряда (справа) определяется число поворотных точек, теоретическое значение определяется по формуле [3]:

$$N = 2/3(n - 2). \quad (4)$$

Далее проведены аналогичные исследования для оценки регулярной части ряда, а именно по согласованию результатов мо-

дели, с результатами широко используемых методов сглаживания рядов, в частности, метода классической декомпозиции и фильтра 4253Н. Ниже, на рис. 3 приведены результаты такого анализа.

Из графиков рисунка видно, что методы классической декомпозиции и фильтра 4253Н дают более сглаженные значения по сравнению с результатами модели, которые более точно отражают основные характеристики исходного ряда, но в целом они согласуются между собой.

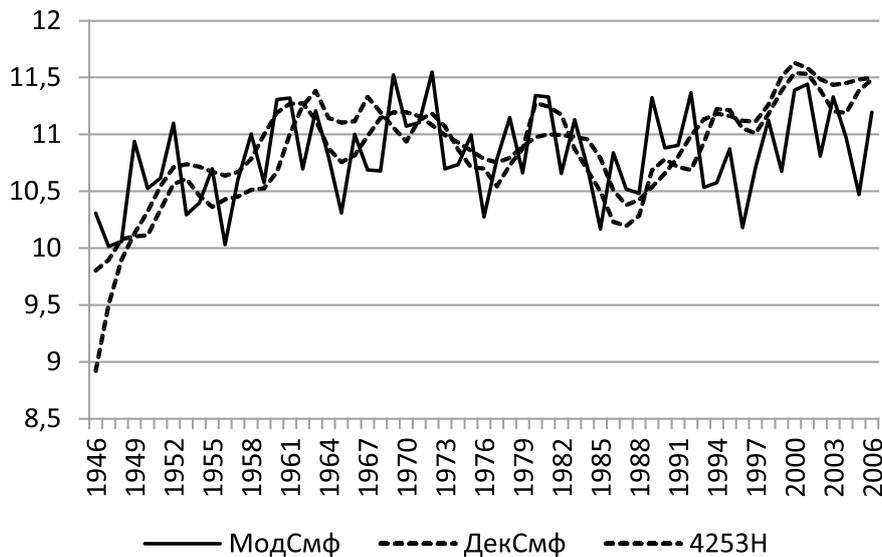


Рис. 3. Графики значений среднегодовой температуры: по модели (сплошная), метод классической декомпозиции (точечная) и фильтра 4253Н (пунктирная)

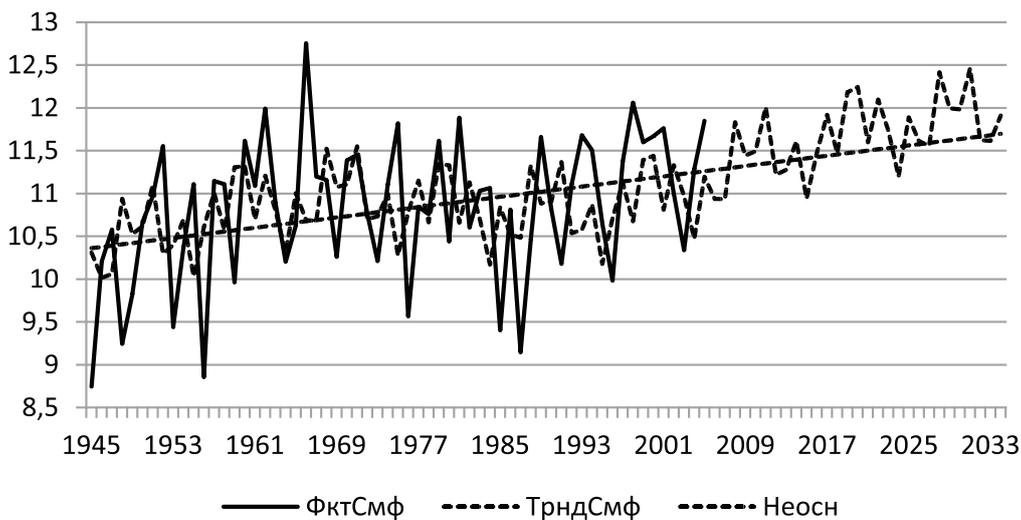


Рис. 4. Фактические (сплошная линия) и прогнозные (пунктирная линия) значения среднегодовой температуры Крыма

Таблица 3

Фактические и прогнозные значения ряда

Факт.	9,98	11,4	12,1	11,6	11,7	11,8	11	10,3	11,3	11,8	Ср
Прогн.	10,2	10,7	11,1	10,7	11,4	11,4	10,8	11,3	11,0	10,5	
Отн. ош.	1,96	5,83	7,75	7,94	2,37	2,73	1,72	9,6	2,76	11,6	5,4

Окончательный выбор параметров модели проводится по наилучшему согласованию (по минимуму невязки) с учетом всех критериев.

В результате для среднегодовой температуры Крыма получена модель вида:

$$T(t) = 10,35 + 0,015 * t - 0,14 \cos\left(\frac{\pi}{30}t\right) + 0,25 \sin\left(\frac{\pi}{30}t\right) - 0,29 \cos\left(\frac{\pi}{30}10t\right) - 0,114 \sin\left(\frac{\pi}{30}10t\right) - 0,337 \cos\left(\frac{\pi}{30}21t\right) + 0,196 \sin\left(\frac{\pi}{30}21t\right). \quad (6)$$

По формуле (6) проведены расчеты прогнозных значений до 2035 года. На рис. 4 приведены графики фактических и прогнозных значений ряда.

Из рис. 4 видно, что прогнозные значения ряда изменяются достаточно сложно в соответствии с моделью (6). На фоне повышения в среднем среднегодовой температуры, от 10,5 до 11,7 градусов, наблюдаются циклические колебания. Наибольшие значения среднегодовой температура будет принимать в 2007–2015, 2021–2025 и 2029–2033 годы, а наименьшие – в 2017–2019 и 2026–2028 годах. Для оценки точности метода, на рисунке

(справа), приведены графики фактических и прогнозных значений ряда за последние 10 лет.

Относительная ошибка прогноза определяется по формуле

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_{\phi i} - y_{\pi i}}{y_{\phi i}} \right| \cdot 100\%,$$

где $y_{\phi i}$, $y_{\pi i}$ – фактические и прогнозные значения ряда, соответственно

Для оценки точности прогноза проведено прогнозирование последних членов ряда, результаты которых приведены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, средняя относительная ошибка последних 10 членов равна 5,4%, максимальная среди них равна 11,6%, которые свидетельствуют о высокой точности прогноза.

Список литературы

1. Андерсон Т.В. Статический анализ временных рядов. – М.: Мир, 1976. – 755 с.
2. Боровиков В.П., Ивченко Г.И. Прогнозирование в системе STATISTICA в среде WINDOWS. – М.: «Финансы и статистика», 1999. – 382 с.
3. М. Кендэл. Временные ряды. – М.: «Финансы и статистика», 1981. – 200 с.
4. Серебренников М.Г., Первозванский А.А. Выявление скрытых периодичностей. – М.: «Наука», 1965. – 244 с.
5. Шугунов Л.Ж., Шугунов Т.Л., Шугунова Л.Э. Методика аппроксимации временных рядов многолетних наблюдений природных процессов. Естественные и технические науки. – 2011. – № 1 (51). – С. 246–250.