

# Статистический анализ временных рядов температуры воздуха приземного слоя атмосферы в различных регионах России

В.А. Газарян  
МГУ имени М.В. Ломоносова  
Финансовый университет при  
Правительстве РФ  
Москва, Россия  
vagazaryan@fa.ru

П.И. Кудрявцев  
МГУ имени М.В. Ломоносова  
Москва, Россия  
pavel2195@gmail.com

А.В. Безрукова  
МГУ имени М.В. Ломоносова  
Москва, Россия  
aleksandra\_bezrukova@mail.ru

Ю.А. Курбатова  
ИПЭЭ им. А.Н. Северцова РАН  
Москва, Россия  
kurbatova.j@gmail.com

Н.Е. Шапкина  
МГУ имени М.В. Ломоносова  
Москва, Россия  
neshapkina@mail.ru

А.И. Чуличков  
МГУ имени М.В. Ломоносова  
Москва, Россия  
achulichkov@gmail.com

**Аннотация**—Анализ региональных трендов приземной температуры воздуха приобрёл в последние годы особую актуальность в связи с изменениями климата, вызванными ростом средней глобальной температуры воздуха. В данной работе проводится оценка основных тенденций многолетней динамики и циклических изменений среднемесячной температуры воздуха в нескольких регионах России, анализируется статистическая значимость и адекватность построенных моделей, приводится их сравнительная характеристика, приводится прогноз региональных тенденций.

**Ключевые слова**— статистический анализ, временной ряд температуры воздуха, регрессионная модель, сезонная декомпозиция, Фурье-анализ, циклические колебания, проверка статистических гипотез.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время изучение пространственно-временной изменчивости климатических параметров, в частности, температуры воздуха, является одной из актуальных задач, так как динамика данного показателя может как положительно, так и в отрицательно влиять на окружающую среду и человеческую деятельность. Статистический анализ и сравнительная характеристика основных тенденций и циклических изменений временных рядов среднесуточной температуры воздуха в приземном слое атмосферы проводятся на основе данных региональных метеорологических станций различных регионов России: Тверской области, Петрозаводска и Якутска (<http://aisori-m.meteo.ru/>).

## 2. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ТЕНДЕНЦИЙ И ЦИКЛИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕГИОНАЛЬНЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА

Временной ряд температуры воздуха —упорядоченная совокупность его значений, измеряемых через строго постоянный промежуток времени [1]. Для построения модели временного ряда температуры в работе применяются такие методы как регрессионный, корреляционный и спектральный анализ [2], различные методы сглаживания и фильтрации [3], а также приводится интерпретация результатов моделирования и обсуждается прогноз региональных тенденций.

Поскольку за долгосрочный период наблюдений не выявлено заметного роста амплитуды сезонных колебаний, в работе используется аддитивная модель декомпозиции временного ряда

$$X_t = s_t + C_t + u_t + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где  $s_t$  — сезонная компонента,  $C_t$  — циклическая компонента,  $u_t$  — тренд, определяющий основную тенденцию временного ряда,  $\varepsilon_t$  — случайная составляющая,  $t = t_1, t_2, \dots, t_N$ ,  $N$  - число уровней ряда.

В результате декомпозиции региональных временных рядов температуры (1) построены полиномиальные регрессионные модели до 4-го порядка включительно, получены статистически значимые оценки параметров регрессии и эмпирические коэффициенты корреляции Пирсона при различных значениях интервала сглаживания.

Регрессионный анализ среднесуточной температуры воздуха за период 1963-2017 гг. в трех различных регионах России показал, что теснота линейной зависимости сглаженного временного ряда от времени связана с периодом сглаживания и достигает максимального значения коэффициента корреляции Пирсона 0,95 при восьмилетнем периоде сглаживания временных рядов температуры Тверской области и Петрозаводска, что позволяет выдвинуть предположение о наличии в указанных регионах восьмилетних температурных циклов.

Для оценки статистической значимости построенных полиномиальных регрессионных моделей решались задачи проверки статистических гипотез о равенстве нулю параметров уравнений регрессии на уровне значимости, не превышающим 0,01, а также задачи интервального оценивания параметров регрессии на уровне доверия не менее 0,9. Показано, что изменение периода сглаживания в диапазоне от 3 до 25 лет не оказывает существенного влияния как на результаты проверки статистических гипотез, так и на размеры доверительных интервалов, а вывод о значимости построенных регрессионных моделей временных рядов температуры подтверждается для всех регионов.

Значения коэффициента корреляции Пирсона для временных рядов Тверской области, Петрозаводска и Якутска составляют 0,60, 0,53 и 0,77 соответственно (рис. 1).

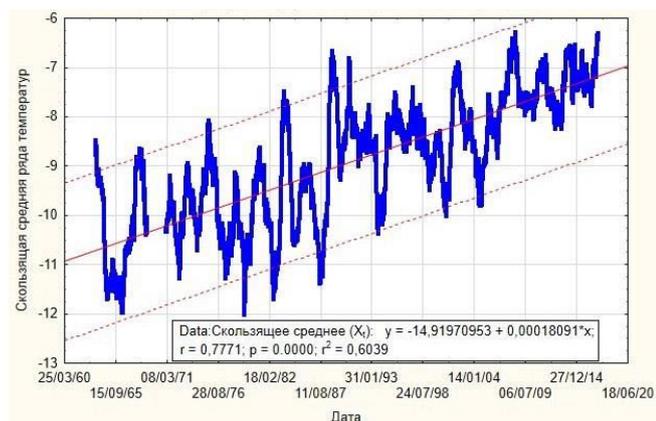


Рис. 1. Сглаженный временной ряд температуры воздуха (Якутск), график уравнения линейной регрессии (прямая линия), доверительный интервал уравнения регрессии на уровне доверия 0,9 (пунктирные линии)

Оценка адекватности построенных моделей результатам наблюдений проводилась с помощью проверки гипотезы о нормальном распределении остаточных компонент региональных рядов, а также о наличии в них линейной корреляционной связи. Критерии Колмогорова-Смирнова, Пирсона и авторегрессионный анализ показали, что остаточные составляющие во всех регионах имеют распределение, близкое к нормальному, что позволяет сделать вывод об адекватности построенных регрессионных моделей. Сравнение результатов проверки гипотез для трёх регионов показало, что наиболее качественной является регрессионная модель временного ряда температуры в Якутске.

После подтверждения стационарности региональных временных рядов с помощью теста Дики – Фуллера, был проведен Фурье-анализ сглаженных с годовым периодом временных рядов температуры, не содержащих сезонных компонент, оценен различный вклад выделенных циклических компонент в суммарные периодограммы сглаженных временных рядов в зависимости от региона. В результате подтверждено предположение о наличии восьмилетнего цикла во временных рядах Тверской области и Петрозаводска, выдвинутое при анализе влияния различных периодов сглаживания на тесноту линейной связи. Показано, что существенный вклад во временной ряд Петрозаводска вносит также циклическая компонента с периодом около трех лет, в то время как во временном ряду Якутска выявленные циклические компоненты вносят существенно меньший вклад в суммарную периодограмму.

Заключительная часть работы посвящена применению метода линейного прогноза, основанного на построении интегрированной модели авторегрессии ARIMA временных рядов температуры трех регионов [4]. Прогнозирование региональных временных рядов осуществлялось путем анализа автокорреляционной и частичной автокорреляционной функций, для оптимизации параметров моделей применялся коэффициент Акаике. Диагностическая проверка

подтвердила несмещенность, стационарность и неавтокоррелированность остаточных составляющих, что свидетельствует о значимости и адекватности построенных моделей прогноза динамики среднесуточной температуры воздуха.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный регрессионный, корреляционный и спектральный анализ временных рядов приземной температуры воздуха трех регионов России показал, что тенденция увеличения среднесуточной температуры воздуха за полувековой период наблюдений отмечается во всех трех регионах, причём построенные регрессионные модели являются статистически значимыми и адекватными. Таким образом, рост среднегодовой температуры воздуха за 1963–2017 гг. составил 2,4°C, 2,1°C и 3,4°C для Тверской области, Петрозаводска и Якутска соответственно. Полученные температурные тренды согласуются с наблюдаемым ростом средней глобальной температуры воздуха. Наиболее значимой и адекватной из построенных в данной работе регрессионных моделей для сглаженных с годовым периодом временных рядов является линейный тренд среднесуточной температуры воздуха в Якутске с коэффициентом корреляции Пирсона, равным 0,77 (рис. 1). Что касается спектрального анализа, то основной вклад во временные ряды Тверской области и Петрозаводска вносят гармоники около восьми и трех лет, которые определяются, по-видимому, особенностями атмосферной циркуляции и солнечно-земных связей, в частности, 11-летним циклом Швабе-Вольфа, в котором за первые 3-4 года происходит увеличение числа солнечных пятен и усиление других проявлений солнечной активности, а в течение последующих 7-8 лет – обратный процесс. При анализе циклических колебаний следует отметить особенность ряда температуры в Якутии: в отличие от временных рядов Тверской области и Петрозаводска, существенных циклических составляющих при построении аддитивной модели временного ряда Якутска не выявлено. По-видимому, такие результаты связаны с особенностями атмосферной циркуляции на региональном уровне.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-29-09044.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gazaryan, V.A. Contemporary climate changes in the southwest of the valdai hills: A statistical analysis of the long-term dynamics of the air temperature / V.A. Gazaryan, J.A. Kurbatova, T.A. Ovsyannikov, N.E. Shapkina // Moscow University Physics Bulletin. – 2015. – Vol. 70(5). – P. 346-352.
- [2] Gazaryan, V.A. A statistical analysis of cyclical changes in the time series of meteorological parameters in the southwest of the valdai hills / V.A. Gazaryan, Y.A. Kurbatova, T.A. Ovsyannikov, N.E. Shapkina // Moscow University Physics Bulletin. – 2018. – Vol. 73(1). – P. 61-67.
- [3] Avilov, V.K. Morphological and other research techniques for almost cycloime series as applied to CO2 concentration series / V.K. Avilov, V.S. Aleshnovskii, A.V. Bezrukova // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2021. – T. 61, № 7. – С. 1106-1117.
- [4] Jain, E. A Study of time series models ARIMA and ETS / E. Jain, D. Mallick // International Journal of Modern Education and Computer Science (IJMECS). – 2017. – Vol. 9(4). – P. 57-63.