

25.00.29
УДК 551.583

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Ташилова А.А.,
Ашабоков Б.А.,
Кешева Л.А.,
Теунова Н.В.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Россия;
tashilovaa@mail.ru
ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Россия; Институт информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН, Россия
ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Россия
ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Россия

ПРОГНОЗ ЛЕТНИХ ТЕМПЕРАТУР МЕТОДОМ СИНГУЛЯРНО-СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА НА ЮГЕ РОССИИ В 2019–2023 гг.

Введение:

В Докладе об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год говорится, что в России продолжается потепление, темпы которого намного превышают глобальное среднее по Земному шару. В последние годы мир стал свидетелем крупнейших в новейшей истории человечества природных катастроф, одной из причин которых являются аномально высокие температуры.

Материалы и методы исследований:

На основе данных метеопараметров за период 1961–2018 гг., предоставленных Северо-Кавказским управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, был проведен анализ и прогноз рядов летних температур юга европейской территории России (ЕТР). В основе анализа и прогноза временных рядов лежит метод сингулярно-спектрального анализа, реализованный в программе «Caterpillar»-SSA. Метод позволяет выделить разного рода закономерности в поведении временных рядов, зачастую априори не очевидные. С помощью программы «Caterpillar»-SSA был осуществлен прогноз средних летних температур на юге ЕТР на период 2019–2023 гг.

Результаты исследований и их обсуждение:

Для возможности применения метода сингулярно-спектрального анализа были выбраны средние летние температуры по результатам критериев предпрогнозирования, определяющих устойчивость тренда: максимальное значение показателя Херста на устойчивость тренда ($H > 0,80$); максимальное значение коэффициента детерминации для определения статистической значимости тренда ($R^2 > 0,20$).

По результатам фрактального анализа трендоустойчивости временных рядов средних летних температур было получено максимальное значение показателя Херста, равное $H = 0,80$. Для выделения трендовой и периодической составляющей были использованы одна (ГК1) и три (ГК3) главные компоненты. Использование первых двадцати главных компонент (ГК20) позволило максимально точно исследовать и восстановить внутреннюю структуру всего временного ряда для последующего прогноза на 5 лет. Восстановление, аппроксимация и прогнозирование ряда осуществлялось полученной линейно-рекуррентной формулой. Качество прогноза определялось следующими критериями: стандартным отклонением прогнозируемого ряда, максимальным отклонением прогнозных значений от реальных, относительной ошибкой прогноза и результатами t -теста, проведенного для исходного и прогнозного ряда за 1998–2018 гг. при 5%-ом уровне ошибки.

Выводы:

По результатам прогноза на период 2019–2023 гг. среднелетняя температура имеет тенденцию к дальнейшему росту. В 2022 г. следует ожидать увеличения среднелетней температуры до $22,0^\circ\text{C}$, что близко к экстремально высокой среднелетней температуре $22,2^\circ\text{C}$ на юге ЕТР в 2010 году.

Ключевые слова:

средние летние температуры, сингулярно-спектральный анализ, главные компоненты, прогноз, остатки модели, t -тест, тренд, юг ЕТР.

- Tashilova A.A., High Mountain Geophysical Institute, Rosgydromet, Russia
tashilovaa@mail.ru
- Ashabokov B.A., High Mountain Geophysical Institute, Rosgydromet, Russia
Institute for Computer Science and Problems of Regional Management,
Federal Scientific Center "Kabardin- Balkar Scientific Center of Russian
Academy of Sciences", Russia
- Kesheva L.A., High Mountain Geophysical Institute, Rosgydromet, Russia
- Teunova N.V., High Mountain Geophysical Institute, Rosgydromet, Russia

The summer temperatures forecast by the method of singular-spectral analysis in the south of Russia in 2019–2023

Introduction: The 2019 Climate Report on the Territory of the Russian Federation states that warming continues in Russia, the rate of which is much higher than the global average for the globe. In recent years, the world has witnessed the largest natural disasters in modern human history, one of the reasons for which are abnormally high temperatures.

Materials and methods of the research: Based on the meteorological data for the period 1961–2018 provided by the North Caucasus Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring, an analysis and forecast of the series of summer temperatures in the south of the European territory of Russia (ETR) was made. The analysis and forecast of time series are based on the method of singular-spectral analysis, implemented in the program «Caterpillar»-SSA. The method makes it possible to single out various regularities in the behavior of time series, which are often not a priori obvious. Forecast of average summer temperatures in the south of the ETR for the period 2019–2023 using the program «Caterpillar»-SSA was carried out.

The results of the study and their discussion: For the possibility of using the method of singular-spectral analysis, the average summer temperatures were selected according to the results of prediction criteria that determine the stability of the trend: the maximum value of the Hurst exponent on trend stability ($H > 0,80$); the maximum value of the determination coefficient to determine the statistical significance of the trend ($R^2 > 0,20$). According to the results of a fractal analysis of the trend persistence of average summer temperatures, the maximum value of the Hurst exponent equal to $H = 0,80$ was obtained. To highlight the trend and periodic component, one (MC1) and three (MC3) main components were used. Using of the first twenty main components (MC20) made it possible to study and restore the internal structure of the entire time series as accurately as possible for a subsequent forecast for 5 years. The restoration, approximation and forecasting of the series was carried out by the obtained linear-recurrence formula. The forecast quality was determined by the following criteria: the standard deviation of the forecast series, the maximum deviation of the forecast values from the real ones, the relative forecast error and the results of the t -test conducted for the initial and forecast series for 1998–2018 at 5% error rate.

Conclusions: According to the forecast for the period 2019–2023 average summer temperature tends to further increase. In 2022, one should expect an increase in average summer temperature to 22,0°C, which is close to the extremely high average summer temperature of 22,2°C in the south of the ETR in 2010.

Keywords: average summer temperatures, singular spectral analysis, main components, forecast, model residuals, t -test, trend, South ETR.

ВВЕДЕНИЕ

В Докладе об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год говорится, что в России продолжается потепление, темпы которого намного превышают глобальное среднее по Земному шару. Средняя скорость роста среднегодовой температуры воздуха на территории России в 1976–2019 гг. составила по данным ФГБУ «ИГКЭ» $0,47\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет. Это более чем в два с половиной раза больше скорости роста глобальной температуры за тот же период: $0,18\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет, и более чем в полтора раза больше средней скорости потепления приземного воздуха над сушей Земного шара: $0,28\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет (оценки по данным Центра Хэдли и Университета Восточной Англии). Температура каждого последующего десятилетия с 1980 г. превышала температуру предыдущего [6].

В последние годы мир стал свидетелем крупнейших в новейшей истории человечества природных катастроф, одной из причин которых являются аномально высокие температуры.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной работе на основе данных метеопараметров, предоставленных Северо-Кавказским УГМС, был проведен анализ рядов летних температур юга европейской территории России (ЕТР) за период 1961–2018 гг.

Существуют две основные цели анализа рядов метеопараметров: определение внутренней структуры ряда и прогнозирование (предсказание будущих значений временного ряда по настоящим и прошлым значениям). Метод анализа временных рядов «Caterpillar»-SSA, в основе которого лежит сингулярно-спектральный анализ, позволяет выделить разного рода закономерности в поведении временных рядов, зачастую априори не очевидные [4, 5]. Техническую основу метода составляет сингулярное разложение матрицы, столбцами которой являются вектора – отрезки ряда длины L , основного параметра метода, называемого шириной окна [7].

С помощью программы «Caterpillar»-SSA был проведен прогноз средних летних температур за период 2019–2023 гг.

Для возможности применения метода SSA были выбраны средние летние температуры по результатам критериев предпрогнозирования, определяющих устойчивость тренда:

- максимальное значение показателя Херста на устойчивость тренда ($H > 0,80$);
- максимальное значение коэффициента детерминации для определения статистической значимости тренда ($R^2 > 0,20$) [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения статистической значимости тренда были использованы критерий Фишера (F -тест) и критерий Стьюдента (t -тест). Регрессионная статистика рядов средних летних температур юга ЕТР за 1961–2018 гг., включающая в себя угловой коэффициент с ошибкой, коэффициент детерминации R^2 , статистику Фишера, статистику Стьюдента для определения статистической значимости (на 5%-ном уровне) полученных коэффициентов, представлена в таблице 1.

Из таблицы 1 видно, значимость t -теста и F -теста меньше допустимой ошибки $p = 0,05$ ($Sig. = 0,00$ при $p < 0,05$), следовательно, угловые коэффициенты линейного тренда $a = 0,037$ °C/год (лето) с $R^2 = 0,386$ статистически значимы, тренд устойчив и к исходному ряду можно применить метод SSA с целью прогнозирования.

Таблица 1. СТАТИСТИКИ РЯДА ЛЕТНИХ ТЕМПЕРАТУР ЮГА ЕТР ЗА 1961–2018 гг.
Table 1. Statistics of the summer temperatures in the South ETR for 1961–2018

$Y = ax + b$	лето
Коэффициент регрессии a , °C / год	0,037
Ошибка коэффициента a	0,006
Коэффициент детерминации R^2	0,386
F -критерий для $df = 56$	35,190
t -тест (критерий Стьюдента)	6,17
Значимость $Sig.$ t -теста на 5%-ном уровне ($p < 0,05$)	0,00
Значимость $Sig.$ F -крит. на 5%-ном уровне ($p < 0,05$)	0,00

По результатам фрактального анализа трендоустойчивости ряда средних летних температур было получено максимальное значение показателя Херста, равное $H = 0,80$. Полученные данные удовлетворяют критериям предпрогнозирования, что позволило выбрать ряд средних летних температур для проведения прогноза на 5 лет (2019–2023 гг.)

Проведем анализ **средней летней температуры** юга ЕТР за период 1961–2018 гг. методом сингулярно-спектрального анализа (SSA) с дальнейшим прогнозом на пять лет 2019–2023 гг. [2].

Для исследования структуры ряда было проведено преобразование, разложение, группировка и восстановление ряда, для чего использовался вариант метода SSA без центрирования матрицы наблюдений, соответствующей исходному ряду [1, 3].

Качество прогностических оценок в методе SSA зависит от того, какие собственные векторы выбраны для восстановления ряда, а так-

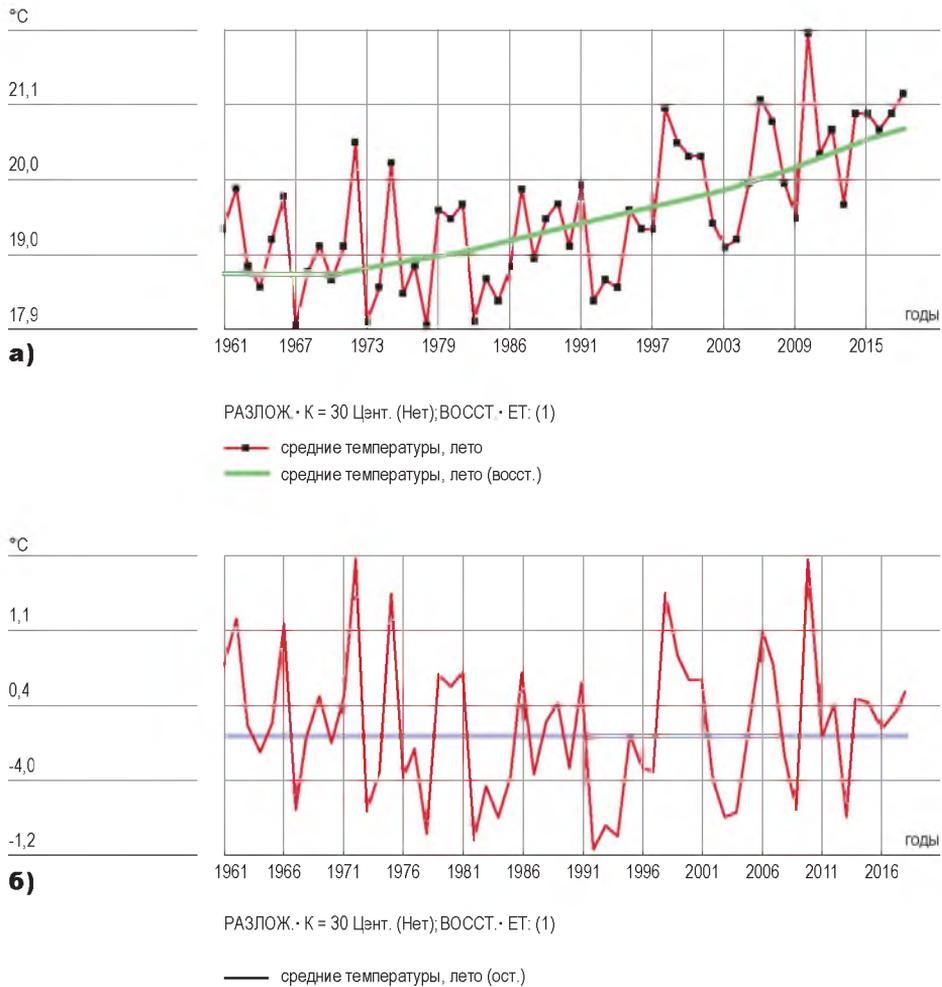


Рис. 1. а) исходный и восстановленный ряды (1 главная компонента);
б) ряд остатков для восстановленного ряда.

Fig. 1 a) the original and restored series (1 main component); b) series of residues for the restored row

же от ширины окна L [4]. Для анализа структуры временного ряда были подобраны оптимальные параметры – ширина окна $L = 29$ с количеством вложенных векторов $K = 30$ ($K = 58 - 29 + 1$). На этапе «группировка» выберем из полученных 30 компонент одну первую главную компоненту для восстановления ряда. На рисунке 1а для исходного ряда (красный) представлены результаты восстановления (зеленый) по первой главной компоненте, которая относится к тренду, медленно меняющейся компоненте ряда, не содержащая колебательных компонент.

На рисунке 1б видно, что восстановленный ряд имеет достаточно большой разброс остатков.

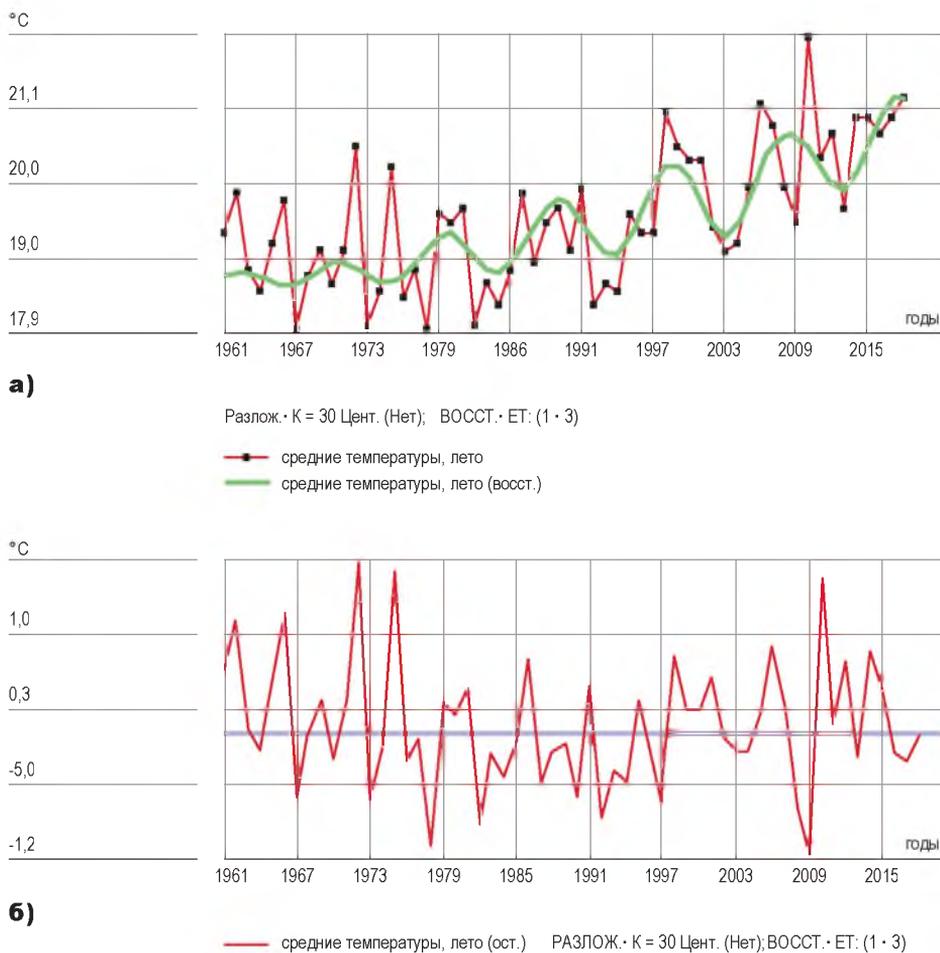


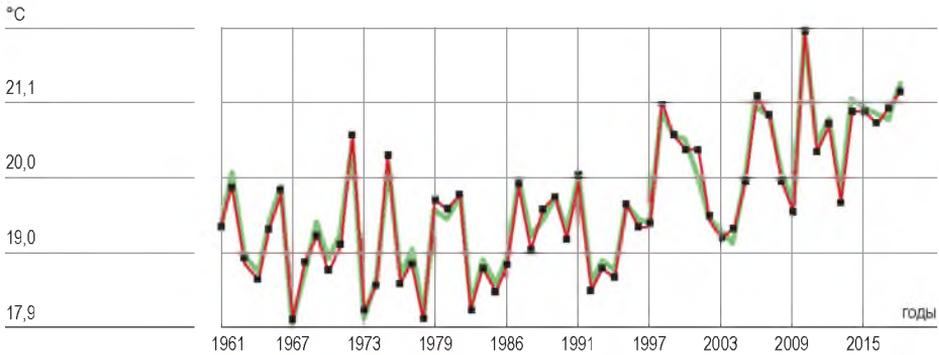
Рис. 2. а) исходный и восстановленный ряды (3 главные компоненты);
б) ряд остатков для восстановленного ряда.

Fig. 2. a) the original and restored series (3 main components);

b) series of residues for the restored row.

Для уточнения восстановленного ряда и восстановления периодичностей к первой компоненте добавим две последующие ГК (ГК 2 – 4,15% объясненной дисперсии; ГК 3–4,11%). На рисунке 2а представлены результаты восстановления по ГК 1–3, которые соответствуют десятигодовой периодике, выраженной наиболее ярко. Разброс остатков восстановленного ряда уменьшился и принимает значения от $-1,2^{\circ}\text{C}$ до $1,7^{\circ}\text{C}$ (рис. 2б).

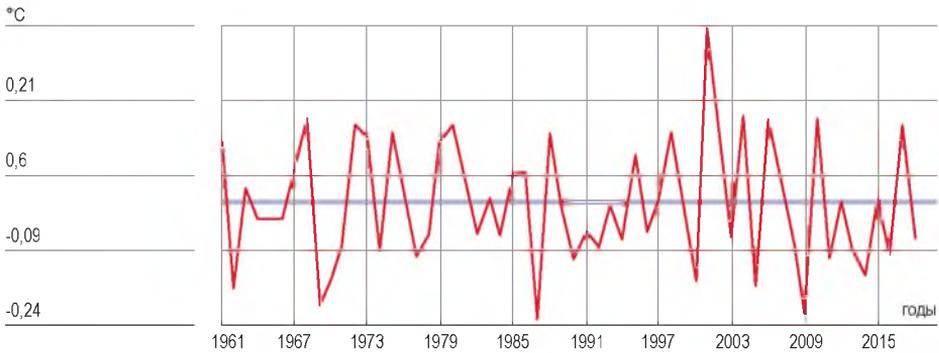
Правильно выбранное количество ГК (собственные тройки) необходимо для точного разделения сигнала (гармоники) от шума.



а)

РАЗЛОЖ. · К = 30 Цэнт. (Нет); ВОССТ. · ЕТ: (1 · 20)

—■— средние температуры, лето
— средние температуры, лето (восст.)



б)

РАЗЛОЖ. · К = 30 Цэнт. (Нет); ВОССТ. · ЕТ: (1 · 20)

— средние температуры, лето (ост.)

Рис. 3. а) Исходный и восстановленный ряды (20 главных компонент);
б) ряд остатков для восстановленного ряда.

Fig. 3. a) The original and restored series (20 main components);

b) series of residues for the restored row.

Таким образом, с помощью SSA можно получить основные компоненты временного ряда: трендовую (ГК1) и периодическую (> ГК3). Вклад суммы основных компонентов (ГК1–20) в исходный процесс составляет по убыванию: ГК1 (41,157%), ГК2 (8,640%), ГК3 (7,514%), ГК4 (6,440%), ..., ГК12 (1,184%), ГК13 (0,807%), ГК (0,002%).

На рис. 3а представлены два ряда, почти совпадающие по траектории, восстановленный (зеленый) и исходный ряд (красный). Выбранные главные компоненты 1–20 дают максимальную точность в восстановлении ряда, имеется минимальная разница в остатках; по одному значению « $-0,24$ °С» в 1986 г. и « $+0,36$ °С» в 2000 г. (рис. 3б).

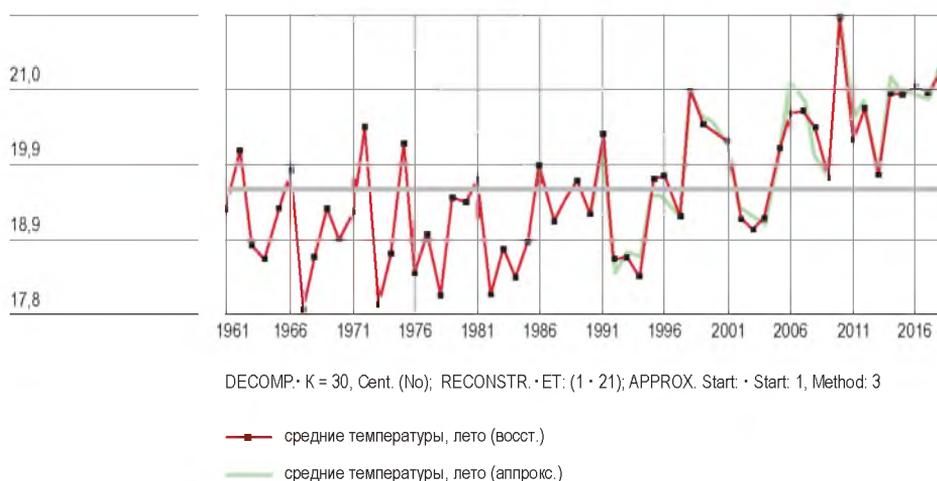


Рис. 4. Реконструированные и аппроксимированные ряды.
Fig. 4. Reconstructed and approximated series.

Таким образом, использование первых двадцати главных компонент позволило максимально точно исследовать и восстановить внутреннюю структуру всего временного ряда (1961–2018 гг.).

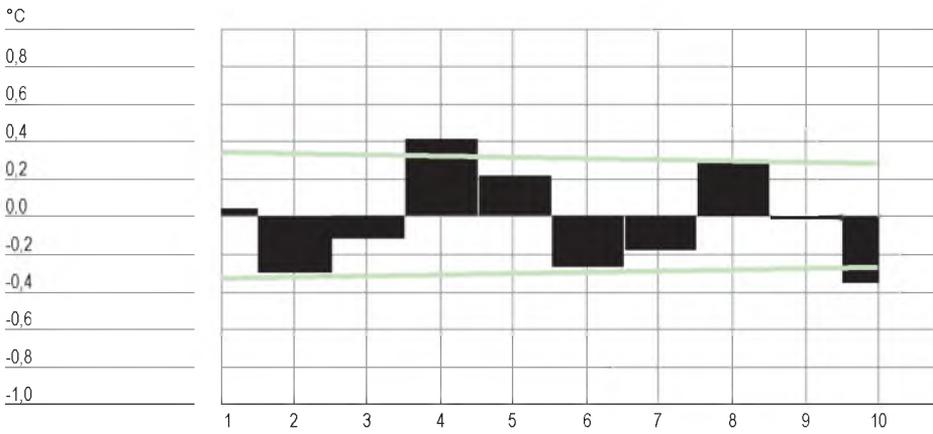
Суммируя матрицы внутри каждого набора и затем, переходя от результирующих матриц внутри каждого набора к ряду, получаем восстановленный ряд из аддитивных слагаемых, состоящих из тренда 1ГК, периодики 1–20 ГК и шума 21–29 ГК или на сумму низкочастотной и высокочастотной составляющих.

Далее на этапе аппроксимации, используя выбранные компоненты, строится аппроксимированный ряд (рис. 4).

Для подтверждения адекватности модели исходному ряду необходимо доказать, что ряд остатков является случайным и подчиняется нормальному закону распределений. Поэтому следующее предположение состоит в том, что ряд остатков (ошибок), на основе которого строится прогноз, должен состоять из независимых одинаково распределенных случайных величин. Таким образом, остатки должны быть некоррелированные и нормально распределены.

На рисунке 5 видно, что автокорреляционная функция в целом подтверждает некоррелированность остатков. Сравнение теоретической и эмпирической функций распределения подтверждает нормальность остатков (значимость: Sig = 0,481).

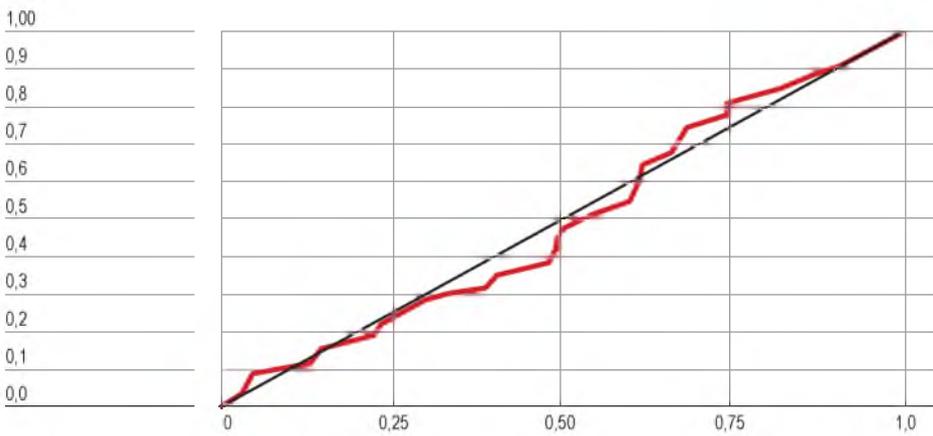
Таким образом, можно считать, что структура временного ряда выявлена и восстановлена, поэтому продолжим эту структуру, строя

**a)**

РАЗЛОЖ. К = 30 Цент. (Нет); ВОССТ. ЕТ: (1-20);

АППРОКС. Начало: 1, Метод: 2

ЗНАЧИМОСТИ: крит. А66е = 0,807 (-), БКР крит. = 0,415, крит. фаз. = 0,843

**б)**

РАЗЛОЖ. К = 30 Цент. (Нет); ВОССТ. ЕТ: (1-20); АППРОКС. Начало: 1, Метод: 2

ЗНАЧИМОСТИ: крит. А66е = 0,807 (-), БКР крит. = 0,415, крит. фаз. = 0,843

Значимость: $w^2 = 0,481$

— эмпирическая ф. р.
— теоретическая ф. р.

Рис. 5.

Проверка остатков на нормальность распределения.

Fig. 5. Checking residues for normal distribution.

тем самым прогноз (продолжение) временного ряда. В одномерном методе SSA такую структуру задает линейная рекуррентная формула (ЛРФ), управляющая рядом:

$$f_{j+d} = \sum_{k=1}^d a_k f_{j+d-k},$$

где $a_d \neq 0$ (1)

Метод SSA позволяет находить коэффициенты линейной рекуррентной формулы, управляющей рядом (или его составляющей) и, следовательно, продолжить ряд [5].

Если два корня являются комплексно-сопряженными:

$$\lambda_1 = a + b\lambda_1 = a - b\lambda_1$$

то оба корня задаются точкой (a, b) на комплексной плоскости (рис. 6).

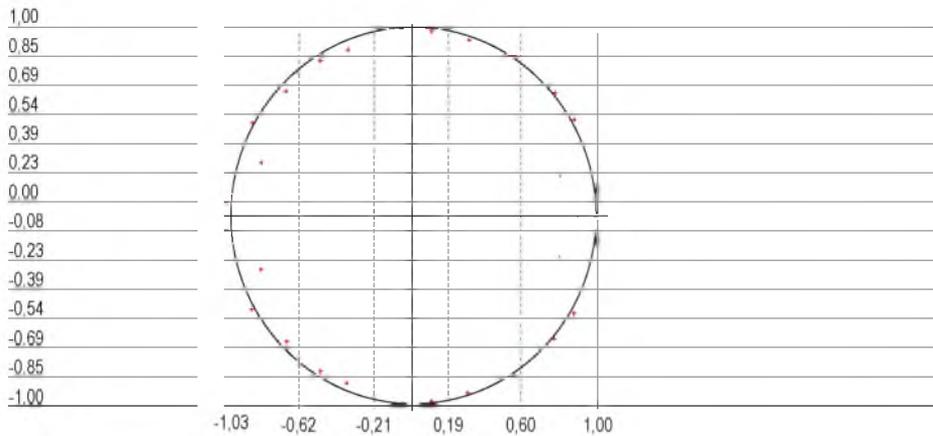
В случае выделения гармоник соответствующие комплексно-сопряженные корни полинома лежат на единичной окружности комплексной плоскости. В случае с рядом средних летних температур таких гармоник выделено достаточно много, что видно из рисунка 6 – большинство точек лежат на окружности.

Асимптотическое поведение компоненты ряда, соответствующей вещественному корню, существенно зависит от ρ . При $\rho < 1$ амплитуда гармонической функции уменьшается, при $\rho > 1$ амплитуда гармоники возрастает.

Корни характеристического полинома гармоник, полученные для прогноза (способ рекуррентный, ширина окна $L = 29$, количество главных компонент ГК = 20), лежат на окружности единичного радиуса (рис. 6) и представлены в таблице 2.

Используя корни характеристического полинома, были определены коэффициенты для линейно-рекуррентной формулы (2), описывающей восстановленный ряд. Воспользуемся таблицей 2 с комплексно-сопряженными корнями и восстановим коэффициенты главной линейно-рекуррентной формулы:

- 1-я строка соответствуют комплексно-сопряженному корню, порождающему гармоники с периодом, равным $T = 2,04$ года (≈ 2 года);
- 2–5-я строки соответствуют гармоникам $T = 11,91$ года (≈ 12 лет), $T = 9,025$ лет (≈ 9 лет), $T = 6,346$ лет (≈ 6 лет),



Decomp. · k = 30, Cent. (No); reconstr. · et: (1-21);

Рис. 6.

Окружность единичного радиуса с корнями характеристического полинома гармоник (ось x – действительная часть корня, ось y – мнимая часть корня).

Fig. 6. The circle of a unit radius with the roots of the characteristic harmonic polynomial (the x axis is the real part of the root, the y axis is the imaginary part of the root).

$T = 3,856$ лет (≈ 4 года), их амплитуда увеличивается, поскольку модули амплитуды больше единицы $\rho > 1$ ($\rho_{1-5} = 1,027; 1,025; 1,017; 1,017; 1,005 > 1$);

- 6-я строка соответствует вещественному корню с модулем $\rho = 1,003$ ($\varphi = 0$, период-бесконечность), является коэффициентом первого члена ЛРФ.

Используя коэффициенты из таблицы комплексно-сопряженных корней (табл. 2), получим формулу для ряда, управляемого минимальной ЛРФ:

$$\begin{aligned}
 f_n = & C_1 1,003^n + C_2 1,027^n \cos(2\pi n/2,043 + \varphi_2) + C_3 1,025^n \cos(2\pi n/11,919 + \varphi_3) + \\
 & + C_4 1,017^n \cos(2\pi n/9,025 + \varphi_4) + C_5 1,017^n \cos(2\pi n/6,46 + \varphi_5) + \\
 & + C_6 1,005^n \cos(2\pi n/3,857 + \varphi_6) + C_7 1,002^n \cos(2\pi n/2,393 + \varphi_7) \quad (2)
 \end{aligned}$$

Коэффициенты C_i и φ_i определяются начальными данными.

Таблица 2. ТАБЛИЦА КОМПЛЕКСНО-СОПРЯЖЕННЫХ КОРНЕЙ
ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО ПОЛИНОМА СРЕДНИХ ЛЕТНИХ
ТЕМПЕРАТУР ЮГА ЕТР
Table 2. A table of complex conjugate roots of a characteristic polynomial
of average summer temperatures in the South ETR

пп	Реальная часть, a	Мнимая часть, ib	Модуль p	Фаза φ	Период T	Комплексность
1	-1,025	0,068	1,027	3,075	2,043	1
2	0,886	0,516	1,025	0,527	11,919	1
3	0,780	0,652	1,017	0,696	9,025	1
4	0,558	0,850	1,017	0,990	6,346	1
5	-0,059	1,003	1,005	1,629	3,856	1
6	1,003	0,000	1,003	0,000	1,00E+100	0
7	-0,872	0,495	1,002	2,625	2,393	1
8	0,111	0,983	0,989	1,458	4,308	1
9	0,306	0,940	0,989	1,257	5,000	1
10	-0,503	0,827	0,968	2,118	2,967	1
11	-0,699	0,667	0,966	2,380	2,640	1
12	-0,352	0,884	0,952	1,950	3,223	1
13	0,903	0,000	0,903	0,000	1,00E+100	0
14	-0,822	0,280	0,868	2,813	2,234	1
15	0,805	0,221	0,835	0,267	23,498	1

Можно отметить, что имеются две гармоники с периодами 12 и 9 лет, совпадающие с периодами солнечной активности (9–13 лет). Линейно-рекуррентная формула (2) используется для аппроксимации ряда (рис. 7).

После восстановления и аппроксимации ряда линейно-рекуррентной формулой (2) можно осуществить прогнозирование ряда (синяя ломаная, рис. 8). Для проверки качества прогноза использовали период упреждения с 1998 по 2018 г. (20 лет) и продолжили прогноз на следующие пять точек с 2019 по 2023 г. Вертикальная черная линия отделяет начало прогноза от фактических данных.

Качество прогноза определялось следующими характеристиками:

Таблица 3. ОДНОВЫБОРОЧНЫЙ Т-КРИТЕРИЙ
Table 3. One-sample t-test

Период 1999–2018 гг.	Проверяемое значение = 20,53 (исходный ряд)					
	t	ст. св.	Значи- мость (2-сто- рон- няя)	Разность средних	95% доверительный интервал разности средних	
					Нижняя граница	Верхняя граница
Средняя летняя температура (восстановленный ряд)	-1,433	20	0,167	-0,24429	-0,5999	0,1113

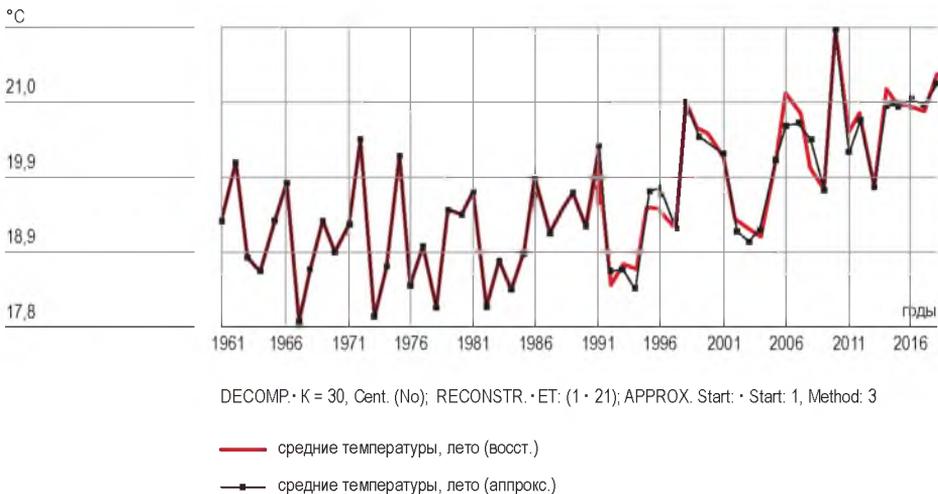


Рис. 7. Реконструированные и аппроксимированные ряды средних летних температур юга ЕТР, 1961–2018 гг.

Fig. 7. Reconstructed and approximated series of average summer temperature in the South ETR, 1961–2018.

стандартное отклонение прогнозируемого ряда, максимальное отклонение прогнозных значений от реальных, относительная ошибка прогноза и t -тест, проведенный для двух рядов: исходного и прогнозного за 1998–2018 гг.

Для выяснения имеется ли статистически значимое различие между средним значением (восстановленного) прогнозного ряда $T_{пр.} = 20,29^\circ\text{C}$ (1998–2018 гг.) и тестовым средним значением фактического ряда $T_{ф.} = 20,53^\circ\text{C}$ (1998–2018 гг.) проведем t -тест (критерий Стьюдента) (табл. 3). Сформулируем «нулевую гипотезу»: среднее значение средне-летней температуры реального ряда за 1998–2018 гг. и среднее значение температуры восстановленного ряда за этот же период статистически равны.

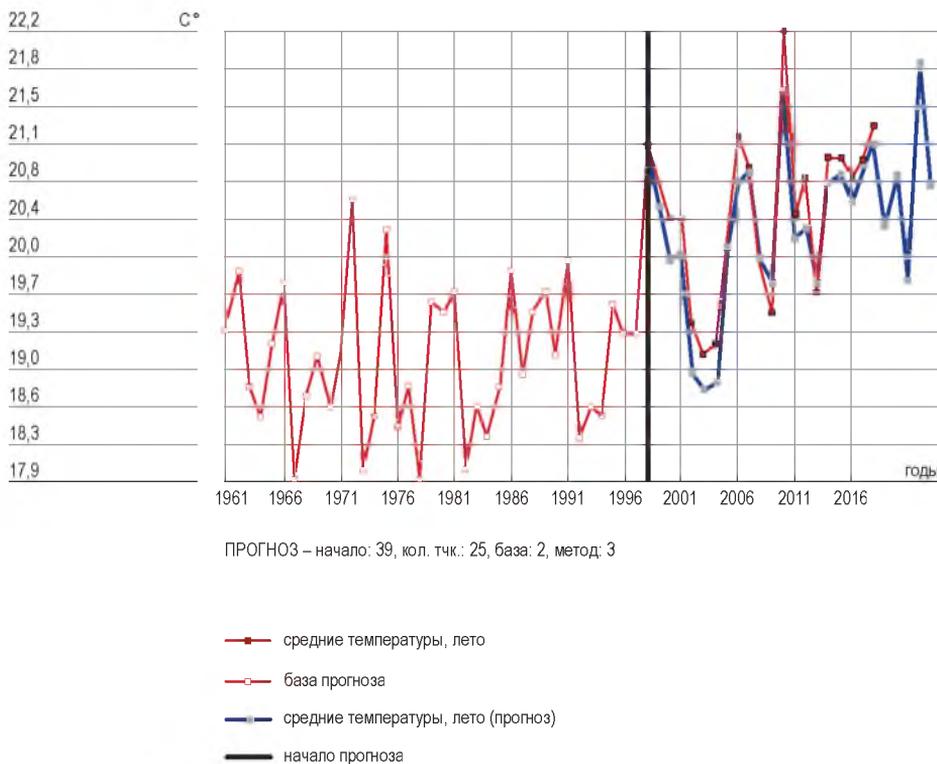


Рис. 8. Прогноз ряда *средней летней* температуры рекуррентным способом на 2019–2023 гг. ($K = 30$, ГК [1–20]).

Fig. 8. Forecast of the series of average summer temperatures in a recurrent method for 2019–2023 ($K = 30$, MC [1–20]).

При отклонении этой гипотезы имеем, что уровень значимости превышает допустимую ошибку $Sig. = 0,167 > 0,05$ (при 95%-ном доверительном интервале). Следовательно, гипотезу отклонить нельзя и среднее значение летней температуры для восстановленного ряда на период 1999–2018 гг. *статистически незначимо* отличается от среднего (тестового) значения реальных данных за этот же период: $20,53\text{ }^{\circ}\text{C} \approx 20,29\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, фактический и прогнозный ряд имеют статистически незначимые различия, что говорит о качественной модели восстановления структуры ряда.

Относительная ошибка прогноза (%) вычисляется по формуле:

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

где y_{np} – прогнозные значения на интервале упреждения 1999–2018 гг.;

Таблица 4.

ПРОГНОЗ СРЕДНЕЙ ЛЕТНЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ на 2019–2023 гг.

Table 4. The forecast for the average summer temperature for 2019–2023

№	Годы	Исходный ряд, °С	Восстановленный ряд, °С	№	Годы	Исходный ряд, °С	Восстановленный ряд, °С
1	1961	19,4	—	51	2011	20,4	20,2
	52	2012	20,8	20,3
38	1998	21,1	21,1	53	2013	19,7	19,8
39	1999	20,6	20,5	54	2014	21,0	20,8
40	2000	20,4	20,0	55	2015	21,0	20,8
41	2001	20,4	20,0	56	2016	20,8	20,6
42	2002	19,4	18,9	57	2017	21,0	20,9
43	2003	19,1	18,8	58	2018	21,3	21,2
44	2004	19,2	18,8	среднее		20,53 °С	20,29 °С
45	2005	20,0	20,2	Периоды (годы)		2; 12; 9; 6; 4	
46	2006	21,2	20,8	59	2019	—	20,3
47	2007	20,9	20,8	60	2020	—	20,9
48	2008	20,0	20,1	61	2021	—	19,7
49	2009	19,5	19,7	62	2022	—	22,0
50	2010	22,2	21,7	63	2023	—	20,6

$У_{ф}$ – фактические значения на этом же интервале 1999–2018 гг. Результаты прогноза на 2019–2023 гг. представлены в таблице 4.

Качество прогноза средней летней температуры:

1. Стандартное отклонение 0,31 °С;
2. Максимальное отклонение 0,556 °С;
3. T -тест Sig = 0,907 (на 5%-ном уровне): средние летние температуры статистически равны на периоде упреждения 1999–2018 гг. : 20,53 °С \approx 20,21 °С.
4. Относительная ошибка $\delta = 1,17\%$.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований получено, что прогноз рекуррентным способом с параметрами ($K = 20$ и ГК 20), является достаточно точным. Ошибка прогноза составляет $\delta = 1,17\% < 20\%$, что свидетельствует о высокой точности модели. С высоким уровнем значимости $\text{Sig.} = 0,907 > 0,05$ среднее значение исходного ряда средней летней температуры $20,53\text{ }^\circ\text{C}$ за период 1998–2018 гг. статистически равно среднему значению прогнозируемого ряда $20,29\text{ }^\circ\text{C}$ за этот же период. Следовательно, структура ряда при параметрах $K = 20$ и ГК 20 восстановлена максимально точно. По результатам прогноза на период 2019–2023 гг. получено, что среднелетняя температура имеет тенденцию к дальнейшему росту. В 2022 г. следует ожидать увеличения среднелетней температуры до $22,0\text{ }^\circ\text{C}$, что близко к экстремально высокой среднелетней температуре $22,2\text{ }^\circ\text{C}$ на юге ЕТР в 2010 году.

**Работа выполнена при финансовой поддержке
Русского географического общества.
Договор №12/2019-Р от 20 мая 2019 г.**

Библиографический список

1. Ашабоков Б.А., Ташилова А.А., Кешева Л.А. Результаты прогноза снежного покрова в Кавказском регионе методом сингулярно-спектрального анализа. Журнал Науки о земле «Наука. Инновации. Технологии». №4. 2018. Ставрополь. С. 65–76.
2. Ашабоков Б.А., Ташилова А.А., Кешева Л.А. Тенденции изменения сумм осадков и средней температуры за периоды 1961–2011 гг. и 1976–2011 гг. на юге Европейской территории России (ЕТР). II Международная научная конференция с элементами научной школы «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата». Ставрополь, 21–25 сентября, 2015 г. С. 140–146.
3. Ашабоков Б.А., Ташилова А.А., Кешева Л.А., Теунова Н.В. Прогноз среднедекадной высоты снежного покрова и числа дней со снегом на юге России на 2018–2022 гг. Третья международная научная конференция с элементами научной школы «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата». 24–28 сентября 2018. Россия, Ставро-

- поль. С. 182–186.
4. Голяндина Н. Э. Метод «Гусеница» – SSA: прогноз временных рядов: учебное пособие: СПб: Изд-во С.-Петербургский гос. университет, 2004. 52 с.
 5. Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов: Учеб. пособие. СПб: С. Петербургский гос. университет, 2004. 76 с.
 6. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год. Бардин М.Ю., Егоров В.И., Николаева А.М., Платова Т.В., Ранькова Э.Я. и др. Москва, 2020. 97 стр.
 7. Ташилова А.А., Кешева Л.А., Балкарова С.Б., Шогенова М.М., Пшихачева И.Н., Таубекова З.А. Структурный анализ и прогноз зимних осадков методом «CATERPILLAR»-SSA Доклады Адыгской (Черкесской) Международной академии наук. 2013. Т. 15. № 1. С. 106–114.
 8. Ташилова А.А., Кешева Л.А., Пшихачева И.Н., Таубекова З.А. Возможности прогнозирования временного климатического ряда с помощью метода «Гусеница»-SSA. Сборник научных трудов Международной научной конференции с элементами научной школы «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата». Ставрополь, 23–26 сентября 2013. С. 86-89.
 9. Ashabokov B.A., Tashilova A.A., Kesheva L.A. The results of the forecast of snow cover in the Caucasus region by the method of singular-spectral analysis. Journal of Earth Sciences “Science. Innovation Technology». Number 4. 2018. Stavropol. Pp. 65–76.
 2. Ashabokov B.A., Tashilova A.A., Kesheva L.A. Trends in precipitation and average temperature over the periods 1961–2011 and 1976–2011 in the south of the European territory of Russia (ETR). II International Scientific Conference with elements of the scientific school «Innovative methods and research tools in the field of atmospheric physics, hydrometeorology, ecology and climate change.» Stavropol, September 21–25, 2015. Pp. 140–146.
 3. Ashabokov B.A., Tashilova A.A., Kesheva L.A., Teunova N.V. The forecast of the average decade's snow depth and the number of days with snow in the south of Russia for 2018–2022. The third international scientific conference with elements of the scientific school «Innovative methods and research tools

- in the field of atmospheric physics, hydrometeorology, ecology and climate change». September 24–28, 2018. Russia, Stavropol. Pp. 182–186.
4. Golyandina N.E. The Caterpillar Method – SSA: Time Series Forecast: Tutorial: St. Petersburg: Publishing House S. Petersburg State. University, 2004. 52 p.
 5. Golyandina N.E. Method «Caterpillar»-SSA: time series analysis: Textbook. allowance. SPb: S. Petersburg State. University, 2004. 76 p.
 6. Report on climate features in the Russian Federation for 2019. Bardin M. Yu., V.I. Egorov, Nikolaev A.M., Platova T.V., Rankova E. Ya. et al. Moscow, 2020. 97 p.
 7. Tashilova A.A., Kesheva L.A., Balkarova S.B., Shogenova M.M., Pshikhacheva I.N., Taubekova Z.A. Structural analysis and forecast of winter precipitation by the «CATERPILLAR»-SSA method. Reports of the Adyghe (Circassian) International Academy of Sciences. 2013. Vol. 15. No. 1. Pp. 106–114.
 8. Tashilova A.A., Kesheva L.A., Pshikhacheva I.N., Taubekova Z.A. Possibilities for predicting the time series using the Caterpillar-SSA method. Collection of scientific papers of the International Scientific Conference with elements of the scientific school «Innovative methods and research tools in the field of atmospheric physics, hydrometeorology, ecology and climate change». Stavropol, September 23–26, 2013. Pp. 86–89.

**Поступило в редакцию 26.03.2020,
принята к публикации 01.06.2020.**

ОБ АВТОРАХ

Ташилова Алла Амарбиевна, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела физики облаков Федерального государственного бюджетного учреждения «Высокогорный геофизический институт».
Адрес: Россия, Кабардино-Балкарская республика, г. Нальчик, пр. Ленина, д. 2.
Scopus ID: 57191577384. Researcher ID: K-4321-2015.
Телефон (928) 692-46-29. E-mail: tashilovaa@mail.ru.

Ашабоков Борис Азреталиевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом физики облаков Феде-

рального государственного бюджетного учреждения «Высокогорный геофизический институт», адрес: Россия, Кабардино-Балкарская республика, г. Нальчик, пр. Ленина, д. 2; заведующий отделом математических методов исследования сложных систем и процессов ФГБУН «Институт информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН».

Scopus ID: 6505916110. Researcher ID: K-4299-2015.

Телефон (928) 707-29-52. E-mail: ashabokov.boris@mail.ru.

Кешева Лара Асировна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения «Высокогорный геофизический институт». Адрес: Россия, Кабардино-Балкарская республика, г. Нальчик, пр. Ленина, д. 2.

Scopus ID: 57191577471.

Researcher ID: K-4261-2015. Телефон (903) 490-47-75.

E-mail: kesheva.lara@yandex.ru.

Теунова Наталия Вячеславовна, научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения «Высокогорный геофизический институт». Адрес: Россия, Кабардино-Балкарская республика, г. Нальчик, пр. Ленина, д. 2.

Scopus ID: 57191571952. Researcher ID: K-4312-2015,

Телефон (903) 492-99-64. E-mail: nata0770@yandex.ru.

ABOUT THE AUTHORS

Tashilova Alla Amarbiyevna, candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, senior research associate of department of physics of clouds of Federal state budgetary institution «High-Mountain Geophysical Institute», Address: Russia, Kabardino-Balkarian Republic, Nalchik, Lenin Ave., 2. Scopus ID: 57191577384. Researcher ID: K-4321-2015.

Phone: (928) 692-46-29, E-mail: tashilovaa@mail.ru.

Ashabokov Boris Azretaliyevich, doctor of physical and mathematical sciences, professor, head of department of physics of clouds of Federal state budgetary institution «High-Mountain Geophysical Institute», head of department of mathematical methods of a research of difficult systems and processes of FGBUN «Institute of Computer Science and Problems of Regional Management, Kabardino-Balkarian Research Center, Russian Academy

of Sciences». Address: Russia, Kabardino-Balkarian Republic, Nalchik, Lenin Ave., 2. Scopus ID: 6505916110.
Researcher ID: K-4299-2015. Phone: (928) 707-29-52.
E-mail: ashabokov.boris@mail.ru.

Kesheva Lara Asirovna, candidate of physical and mathematical sciences, senior research associate of department of physics of clouds of Federal state budgetary institution «High-Mountain Geophysical Institute». Address: Russia, Kabardino-Balkarian Republic, Nalchik, Lenin Ave., 2. Scopus ID: 57191577471
Researcher ID: K-4261-2015. Phone: (903) 490-47-75.
E-mail: kesheva.lara@yandex.ru.

Teunova Nanaliya Vyacheslavovna, senior research associate of department of physics of clouds of Federal state budgetary institution «High-Mountain Geophysical Institute». Address: Russia, Kabardino-Balkarian Republic, Nalchik, Lenin Ave., 2.
Scopus ID: 57191571952. Researcher ID: K-4312-2015.
Phone: (903) 492-99-64. E-mail: nata0770@yandex.ru.

Ъ

Издательство Северо-Кавказского федерального университета. г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1.

Корректор – М.И. Толмачев.
Компьютерная верстка – О.Г. Полевич.

Подписано в печать 23.06.2020 г. Выход в свет 30.06.2020 г
Формат 70 × 108 1/16. Гарнитура Times New Roman. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 8,26. Тираж 1000 экз. Цена 534 руб.

Отпечатано в Издательско-полиграфическом комплексе ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет». 355029, г. Ставрополь, пр-т Кулакова, 2.