

1.6.18.
УДК 551.578.42
DOI:

НАУКИ ОБ АТМОСФЕРЕ И КЛИМАТЕ
(ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ)
10.37493/2308-4758.2023.3.2

Афанасьев И. С., Северо-Кавказский федеральный университет,
Закинян Р. Г., г. Ставрополь, Россия;
Аджиева А. А. Высочгорный геофизический институт, г. Нальчик, Россия;
Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет
имени В.М. Кокова, г. Нальчик, Россия

ВНУТРИГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИЗЕМНОГО ВОЗДУХА И ЕЁ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ГОРОДА СТАВРОПОЛЯ

Введение. Известно, что временной ход температуры в течение года носит сезонный характер. Однако темпы роста температуры в переходные периоды разные. Это осложняет прогнозирование такого важного, в частности для сельского хозяйства, параметра, как температура воздуха приземного слоя атмосферы. Соответственно, в статье проводится анализ внутригодовой изменчивости температуры воздуха и её сопоставление с синусоидальной моделью годового хода температуры.

Материалы и методы исследований. Рассматриваются временные ряды температуры воздуха приземного слоя атмосферы для города Ставрополя и ставится задача – сравнение фактических и теоретических значений годовых амплитуд. В элементарной (синусоидальной) модели эта теоретическая величина оказывается прямо пропорциональной годовой дисперсии. Также рассмотрен временной ряд разностей температур (межмесячные изменения), так называемых дискретных производных, и проводится сравнение обычной и дискретной производной функции синуса в качестве элементарной модели годового хода температуры. Вводится новая величина – среднеквадратичное отклонение изменчивости, которое также характеризует дисперсию, но не для ряда температур, а их разностей.

Результаты исследований и их обсуждение. Отмечается, что теоретическое (т.е. справедливое для синусоидальной модели) и фактическое значение амплитуды годового хода температуры достаточно хорошо согласовываются. Однако из-за непериодических отклонений разница между этими величинами может достигать 2 °С, которая на графике внутригодовой изменчивости характеризуется асимметрич-

ностью. Кроме того, рассматривается среднесноголетний годовой ход температуры и проводится его анализ с использованием дискретных производных. Показано, что отношение амплитуды годовой температуры к амплитуде дискретной производной этой величины равно циклической частоте колебаний годового хода температуры.

Выводы.

Полученные результаты подтверждают возможность использования синусоидальной модели годового хода температуры (хотя и с некоторыми ограничениями, связанными с асимметричностью и сдвигом внутригодовых пиковых точек). Анализ годового хода температуры с помощью дискретных производных и его сопоставление с синусоидальной моделью позволил выявить особенности среднесноголетней внутригодовой изменчивости температуры приземного воздуха для г. Ставрополя за период 1944–2022 гг. (иногда наблюдается изменение темпов нагрева или охлаждения, в редких случаях – инверсия при рассмотрении временного ряда среднемесячных температур).

Ключевые слова: температура воздуха, среднемесячная температура, годовой ход температуры, амплитуда, элементарная (синусоидальная) модель, временной ряд, отклонение, дисперсия, дискретная производная, изменчивость

**Afanasyev I. S.,
Zakinyan R. G.,
Adzhieva A. A.**

North Caucasus Federal University,
Stavropol;
High-Mountain Geophysical Institute, Kabardino-Balkarian
State Agrarian University named after V.M. Kokov, Nalchik,
Russia

Intra-annual Variability of Surface Air Temperature and Its Modeling for the City of Stavropol

Introduction.

It is known that the time course of temperature during the year is seasonal. However, the rates of temperature growth in transition periods are different. This complicates the prediction of such an important parameter, in particular for agriculture, as the air temperature of the surface layer of the atmosphere. Accordingly, the article analyzes the intra-annual variability of air temperature and compares it with a sinusoidal model of the annual temperature course.

Materials and research**methods.**

The time series of the air temperature of the surface layer of the atmosphere for the city of Stavropol are considered and the task is to compare the actual and theoretical values of annual amplitudes. In the elementary (sinusoidal) model, this theoretical value turns out to be directly proportional to the annual variance. The time series of temperature differences (inter-monthly changes), the so-called discrete derivatives, is also considered, and the comparison of the usual and discrete derivative of the sine function as an elementary model of the annual temperature course is carried out. A new value is introduced – the standard deviation of variability, which also characterizes the variance, yet not for a number of temperatures, but their differences.

Research results and**their discussion.**

It is noted that the theoretical (i.e., valid for the sinusoidal model) and the actual value of the amplitude of the annual temperature course are quite well matched. However, due to non-periodic deviations, the difference between these values can reach 2 °C, which is characterized by asymmetry on the intra-annual variability chart. In addition, the average annual temperature course is considered and its analysis is carried out using discrete derivatives. It is shown that the ratio of the annual temperature amplitude to the amplitude of the discrete derivative of this value is equal to the cyclic frequency of fluctuations of the annual temperature course.

Conclusions.

The results obtained confirm the possibility of using a sinusoidal model of the annual temperature course (although with some limitations related to the asymmetry and shift of intra-annual peak points). The analysis of the annual temperature course using discrete derivatives and its comparison with the sinusoidal model revealed the features of the average annual intra-annual variability of surface air temperature for the city of Stavropol for the period 1944 – 2022. Sometimes there is a change in the rate of heating or cooling; in rare cases, there is an inversion when considering the time series of average monthly temperatures).

Keywords:

air temperature, average monthly temperature, annual temperature course, amplitude, elementary (sinusoidal) model, time series, deviation, variance, discrete derivative, variability

Введение

Сегодня временные ряды, позволяющие рассмотреть годовой и многолетний ход температуры приземного воздуха, достаточно хорошо изучены. Например, для определения сезонности и циклов временного ряда температур проводят спектральный и автокорреляционный анализ [3, 15, 20]. Также исследователи используют сингулярно-спектральный анализ – это позволило провести анализ и прогноз рядов летних температур юга европейской территории России (ЕТР) [14, 19]. Использование данных методов подтверждает проблему глобального потепления, на их основе также строят прогностические модели [1, 13, 16].

Однако, помимо изучения самих временных рядов, интересно проследивать их изменчивость, то есть насколько быстро (и ускоренно) температура меняется, особенно при рассмотрении смены времён года. Ранее проводились исследования по расчету и анализу температурного режима воздуха в феврале–марте и дат устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через 0°C в сторону повышения для юга России. Средняя дата наступления весны, несмотря на значительные колебания от года к году, в каждом из рассматриваемых многолетних периодов смещалась на более ранние сроки [4]. В текущей работе будет рассмотрено, в какие месяцы температура воздуха ускоренно растёт или падает на примере изменчивости (дискретной производной), что позволит более детально, по сравнению с традиционным анализом, изучить годовой ход температуры [9, 17].

Соответственно, рассматриваются такие инструменты анализа температуры, как годовая дисперсия и межмесячная изменчивость (разница между соседними месяцами, дискретная производная ВР температур). Также проводится сопоставление годового хода температуры с элементарной синусоидальной моделью. Это позволяет изучить климатические особенности г. Ставрополя, используя новые подходы, указанные выше.

Для внутригодовой изменчивости общепринятая амплитуда равна половине разности температуры наиболее жаркого и наиболее холодного месяца. Кроме того, при аппроксимации годового ход температуры можно представить в виде синусоидального распределения. Однако в этом случае амплитуда колебаний будет иметь уже

другое значение [12]. Также при рассмотрении годового хода температуры наблюдаются непериодические отклонения, связанные с замедлением либо ускорением изменения среднесуточной температуры (например, «бабье лето»). Это отражается и на значениях среднемесячных температур, из-за чего график годового хода оказывается асимметричным. Выявление непериодических отклонений предполагает сравнение фактического и синусоидального годового хода температуры.

Задачами данной работы являются: анализ временных рядов температуры и их статистических характеристик, нахождение дискретных производных к данным величинам.

Целью данной работы является изучение особенностей годового хода температуры и его сравнение с моделью синусоидального хода температуры, используя статистические величины (отклонение, дисперсия) и рассматривая ряды разностей температур (изменчивость).

Материалы и методы исследований

При рассмотрении внутригодовой изменчивости приземной температуры воздуха для г. Ставрополя проводился статистический анализ данных среднемесячных температур за период 1944–2022 гг. В работе рассчитываются следующие величины:

- 1) *внутригодовое отклонение $\hat{T}$* — разность между среднемесячным T_{ij} и среднегодовым $\bar{T}_i$ значениями температуры, т. е. $\hat{T}_{ij} = T_{ij} - \bar{T}_i$ (*сезонная составляющая*);
- 2) *годовая амплитуда T_{0j}* ;
- 3) *среднеквадратичное отклонение (выборочная дисперсия) температуры σ_i* для i -го года (j — индекс месяца):

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum \hat{T}_{ij}^2}{12}}; \quad (1)$$

- 4) *межмесячное изменение температуры* — *разница значений температуры воздуха между соседними месяцами $\Delta T_j = T_j - T_{j-1} = \hat{T}_j - \hat{T}_{j-1}$* (прогрев или охлаждение).

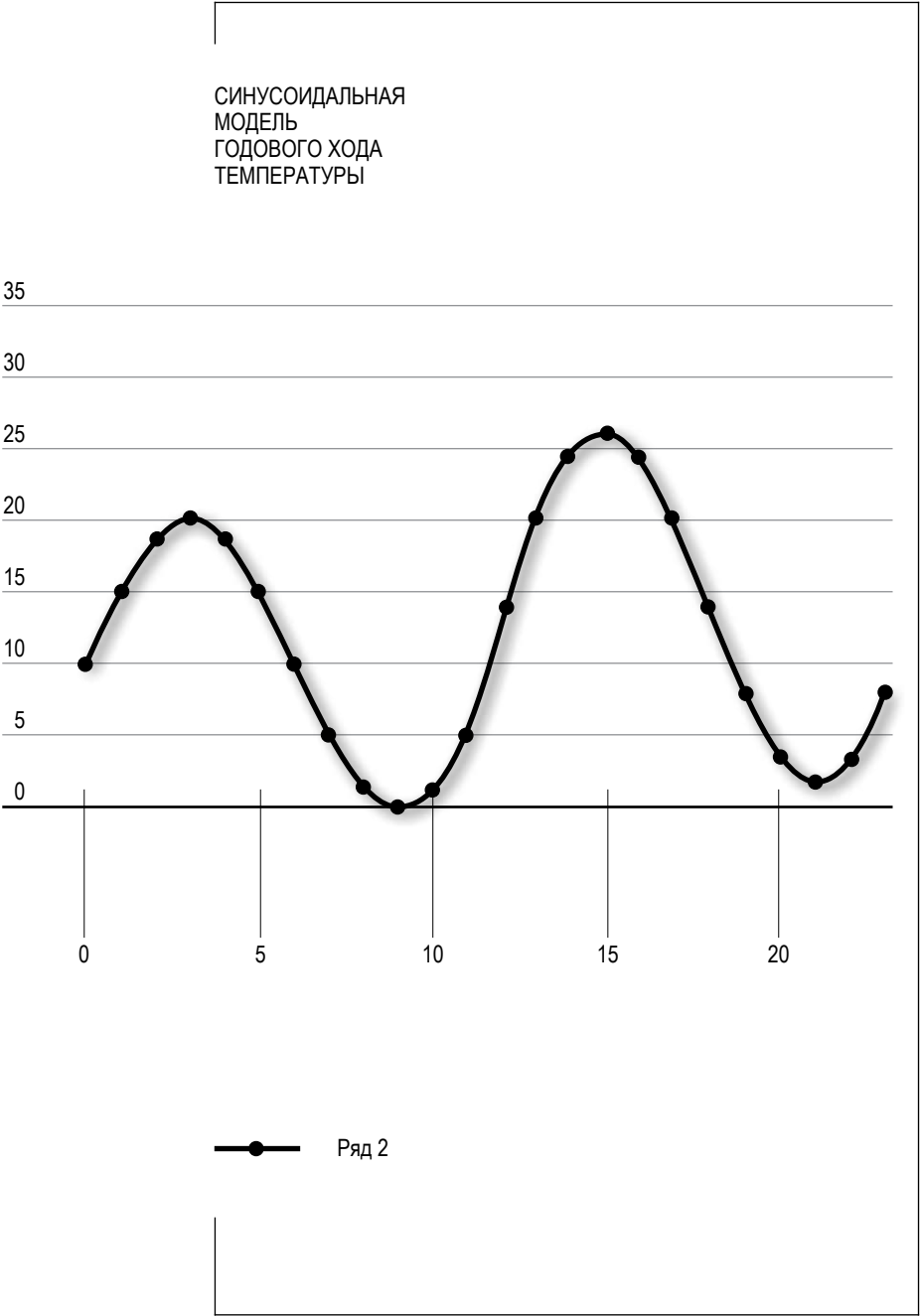


Рис. 1. Пример синусоидальной модели годового хода температуры для двух лет с разными годовыми амплитудами и среднегодовыми значениями.

Fig. 1. An example of a sinusoidal model of the annual temperature course for two years with different annual amplitudes and average annual values.

**Элементарная (синусоидальная)
модель годового хода
температуры**

На основе указанных характеристик была предложена элементарная модель годового хода температуры (внутригодовой изменчивости), согласно которой изменение внутригодового отклонения температуры воздуха по месяцам имеет преимущественно синусоидальный характер:

$$\hat{T} = T_0 \sin\left(\frac{2\pi}{12}t + \varphi_0\right), \quad (2)$$

где время t — в мес.;

T_0 — годовая амплитуда, которая причём различная для каждого года;

φ_0 — начальная фаза, когда температура равна среднегодовой;

$\omega = \frac{2\pi}{12}$ — циклическая частота годового хода температуры.

Аналогично можно записать функцию модели годового хода температуры (2) в виде: $T = \bar{T} + T_0 \sin\left(\frac{2\pi}{12}t + \varphi_0\right)$. На рисунке 1 заданы гармонические функции $T = 10 + 10\sin\left(\frac{2\pi}{12}t\right)$ для первого года и $T = 14 + 12\sin\left(\frac{2\pi}{12}t\right)$ для второго года.

Фактическое значение годовой амплитуды температуры $T_{0\text{факт}}$ равно половине разности максимальной $T_{\max}$ и минимальной $T_{\min}$ среднемесячных значений температуры за год:

$$T_{0\text{факт.}} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2}. \quad (3)$$

В случае, когда график годового хода температуры близок к синусоидальному (2), можно найти теоретическое значение амплитуды через годовую дисперсию среднемесячных температур (1). С учётом равенства $\sqrt{\sum_{n=1}^{12} \sin^2 \frac{2\pi n}{12}} = 6$ получаем соотношение:

$$T_{0\text{теор.}} = \sqrt{2}\sigma. \quad (4)$$

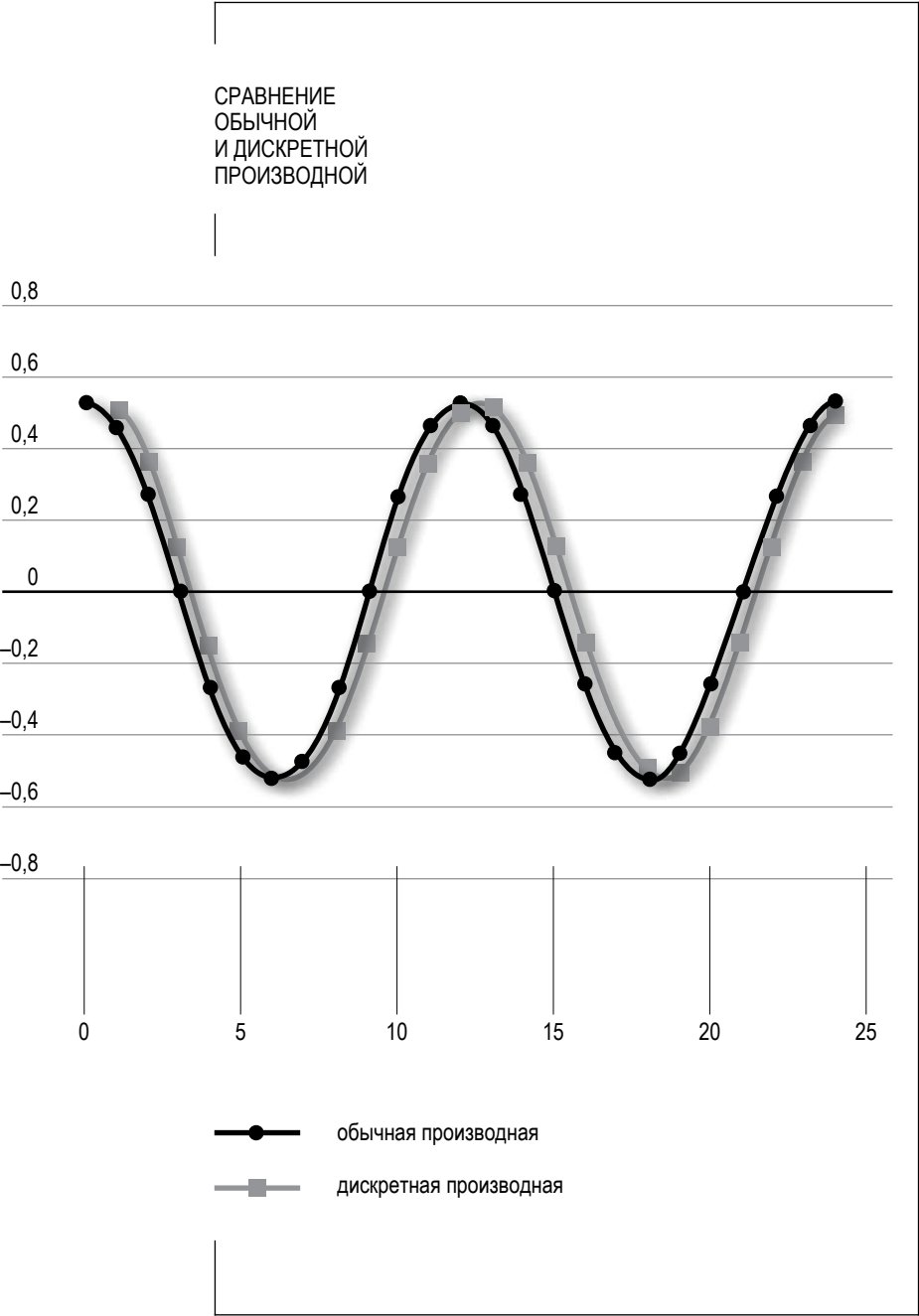


Рис. 2. Обычная и дискретная производная к синусоиде с годовым периодом (по оси *OX* — время в мес., по оси *OY* — значение амплитуды разностей температур)

Fig. 2. Ordinary and discrete derivatives of a sinusoid with an annual period (on the *OX* axis — time in months, on the *OY* axis — the value of the amplitude of the temperature differences)

*Дискретные производные и изменчивость
в синусоидальной модели годового хода
температуры*

Дискретной производной последовательности T_i называют такую последовательность ΔT_i , которая может быть представлена в виде ряда разностей соседних среднемесячных значений температур $T_2 - T_1, T_3 - T_2, \dots, T_i - T_{i-1}$. Дискретная производная первого порядка в данном примере характеризует межмесячное изменение температуры.

Рассмотрим нахождение обычной и дискретной производной функции синуса (2), которая используется в качестве модели годового хода температуры, считая, что $T_0 = 1^\circ\text{C}$ (единичная амплитуда) и $\varphi_0 = 0$. На рисунке 2 обычная производная элементарной функции годового хода температуры – $\hat{T}' = \frac{2\pi}{12} T_0 \cos\left(\frac{2\pi}{12}t + \varphi_0\right)$, дискретная – $\Delta T(t) = T(n) - T(n-1)$, здесь $\omega = \frac{2\pi}{12}$.

Можно заметить, что существенной разницы между графиками обычной и дискретной производной гармонической функции нет. Значение амплитуды межмесячной *изменчивости годового хода температуры* получилось равным $\Delta T_0 = \omega T_0$ для обеих производных. Однако иногда они либо «опаздывают», либо «спешат» относительно друг друга по времени примерно до полумесяца.

Из этого следует, что если реальный годовой ход температуры близок к гармоническому, то нахождение дискретных производных к графику этой функции оправдано. Для этого, во-первых, сравниваем значения теоретического (4) и фактического (3) значения амплитуд, во-вторых, соотношение амплитуды годового хода температуры и изменчивости должно быть равно ω , т. е. $\omega = \Delta T_0 / T_0$, в-третьих, сдвиг фаз между графиками годового хода температуры и её изменчивости (дискретной производной) должен быть равен $\pi/2$.

В синусоидальной модели годового хода температуры теоретическое значение амплитуды связано с дисперсией (4). Аналогично (1) для годового хода межмесячной изменчивости температуры введём *среднеквадратичное отклонение изменчивости* этой величины (*коэффициент изменчивости*):

$$\sigma_{\text{изм}_i} = \sqrt{\frac{\sum \Delta \hat{T}_{ij}^2}{12}}. \quad (5)$$

Заметим, что размерности величин дисперсии и коэффициента изменчивости разные: температура воздуха T_{ij} (или её отклонение от среднегодовой $\hat{T}_{ij}$) измеряется в $^{\circ}\text{C}$, а дискретная производная температуры воздуха $\Delta\hat{T}_{ij}$ (межмесячное изменение температуры) — в $^{\circ}\text{C}/\text{мес}$.

Значения коэффициента изменчивости для обычной и дискретной производной получились практически одинаковыми. Из формул (1), (2), (4), (5) и рисунка 2 получаем соотношение:

$$\sigma_{\text{изм.}} = \omega \sigma_{\text{ср.кв.}} \quad (6)$$

Вывод:

$$\sigma_{\text{изм.}} = \sqrt{\frac{\sum \Delta\hat{T}_{ij}^2}{12}} = \sqrt{\frac{(\omega T_0)^2 \sum_1^{12} \sin^2 \frac{2\pi n}{12}}{12}} = \omega \sqrt{\frac{\sum_1^{12} T_0^2 \sin^2 \frac{2\pi n}{12}}{12}} = \omega \sigma_{\text{ср.кв.}}$$

Также из (4) и (6) следует, что $\Delta T_{0\text{теор.}} = \sqrt{2} \sigma_{\text{изм.}}$ поэтому для элементарной модели годового хода температуры на рисунке 2 получили среднеквадратичное отклонение равным 0,71 ($1/\sqrt{2}$), среднеквадратичную изменчивость — 0,37 (отличие в $2\pi/12$ раз).

Таким образом, можно сравнить соотношение амплитуд графиков годового хода температуры и изменчивости также через нахождение среднеквадратичного отклонения и коэффициента изменчивости (6), а не только через разницу между максимальным и минимальным значениями среднемесячных величин (3).

При рассмотрении годового хода температуры переход на дискретную производную уместен (рис. 2), это позволяет нам рассмотреть характер изменения температуры по месяцам. Использование дискретных производных оправдывает себя только для колебательного процесса, в остальных случаях нужно избавляться от тренда (например, для полинома n -ой степени разница между обычной и дискретной производной растёт прямо пропорционально t^{n-2}).

Кроме того, в идеальной модели годового хода температуры есть ярко выраженные минимумы и максимумы, чередующиеся каждые 6 месяцев, хотя в реальности сдвиг между пиковыми значениями варьируется в пределах 5–7 мес. (наиболее морозные времена года — январь–февраль, наиболее жаркие — июль–август). Эта

особенность накладывает некоторые границы применимости модели синусоидального хода температуры.

Для более детального анализа можно найти и *вторую дискретную производную*. Её примером является $\Delta_2 T_{31} = \Delta T_{32} - \Delta T_{21}$. При нахождении дискретных производных получаем графики функций, которые в идеале должны были быть схожими с тригонометрическими. Кроме того, амплитуда должна была бы изменяться в ω раз после каждого последующего взятия производной.

Итак, на основе данных можно получить среднестатистический годовой ход температуры за последнее время, её отклонение от среднегодовых значений и производные этой величины. Кроме того, следует провести сопоставление между фактическими и теоретическими значениями температурных характеристик. Это позволит рассмотреть элементарную модель годового хода температуры и её ограничения.

Результаты исследований и их обсуждение

Быстрое преобразование Фурье в программе Statistica 12 показывает, что временной ряд среднемесячных значений температуры для произвольного 5–10-летнего диапазона имеет только единственную значимую гармонику колебаний с периодом в 12 мес., что допускает идею использования синусоидальной модели годового хода температуры приземного воздуха для рассмотрения особенностей внутригодовой изменчивости (2). В этой модели учитывается, что амплитуда температуры имела различные значения для каждого года. Соответственно, были получены как фактические (3), так и теоретические значения (4) годовой амплитуды для периода 1944–2022 гг.

Можно заметить, что теоретическое и фактическое значение амплитуды годового хода температуры достаточно хорошо согласуются (рис. 3, б), коэффициент детерминации между этими величинами $R^2 = 0,7$. Однако почти во всех случаях $T_{0\text{факт.}} \geq T_{0\text{теор.}}$, на пиковых значениях разница достигает 2 °С (рис. 3, а), в среднем же отношение между величинами составляет 1,05 (рис. 3, б).

В целом, эти особенности можно объяснить тем, что годовой ход температуры асимметричен. Разница между фактической и теоретической годовой амплитудой будет усиливаться, если в отдельные

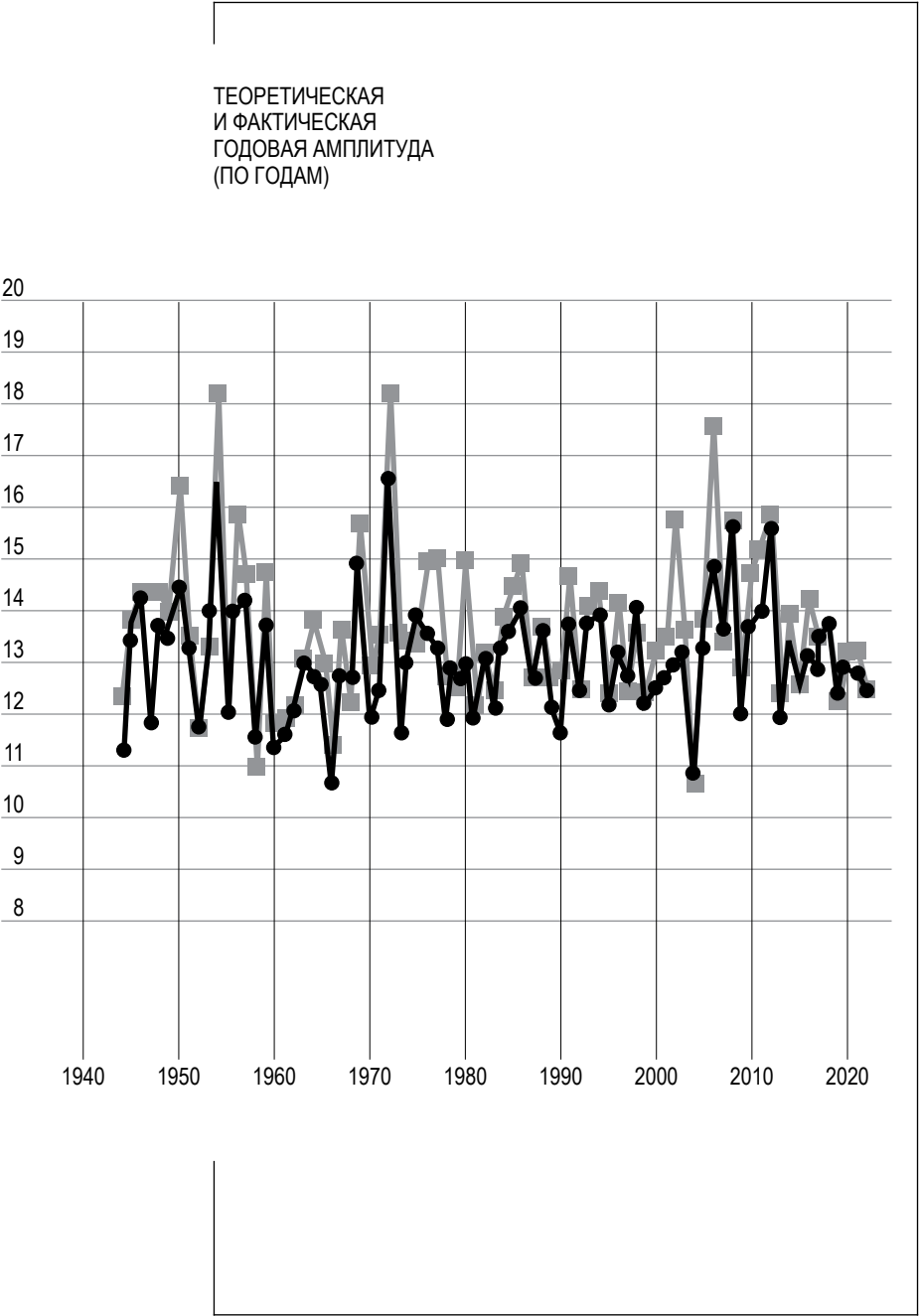


Рис. 3, а. **Изменение теоретической (квадратики) и фактической (ромбики) годовой амплитуды; по оси OX — года, по оси OY — значения величин в °C.**

Fig. 3, a. Change in the theoretical (squares) and actual (rhombuses) annual amplitude; on the OX axis — the year, on the OY axis — the values of the values in °C.

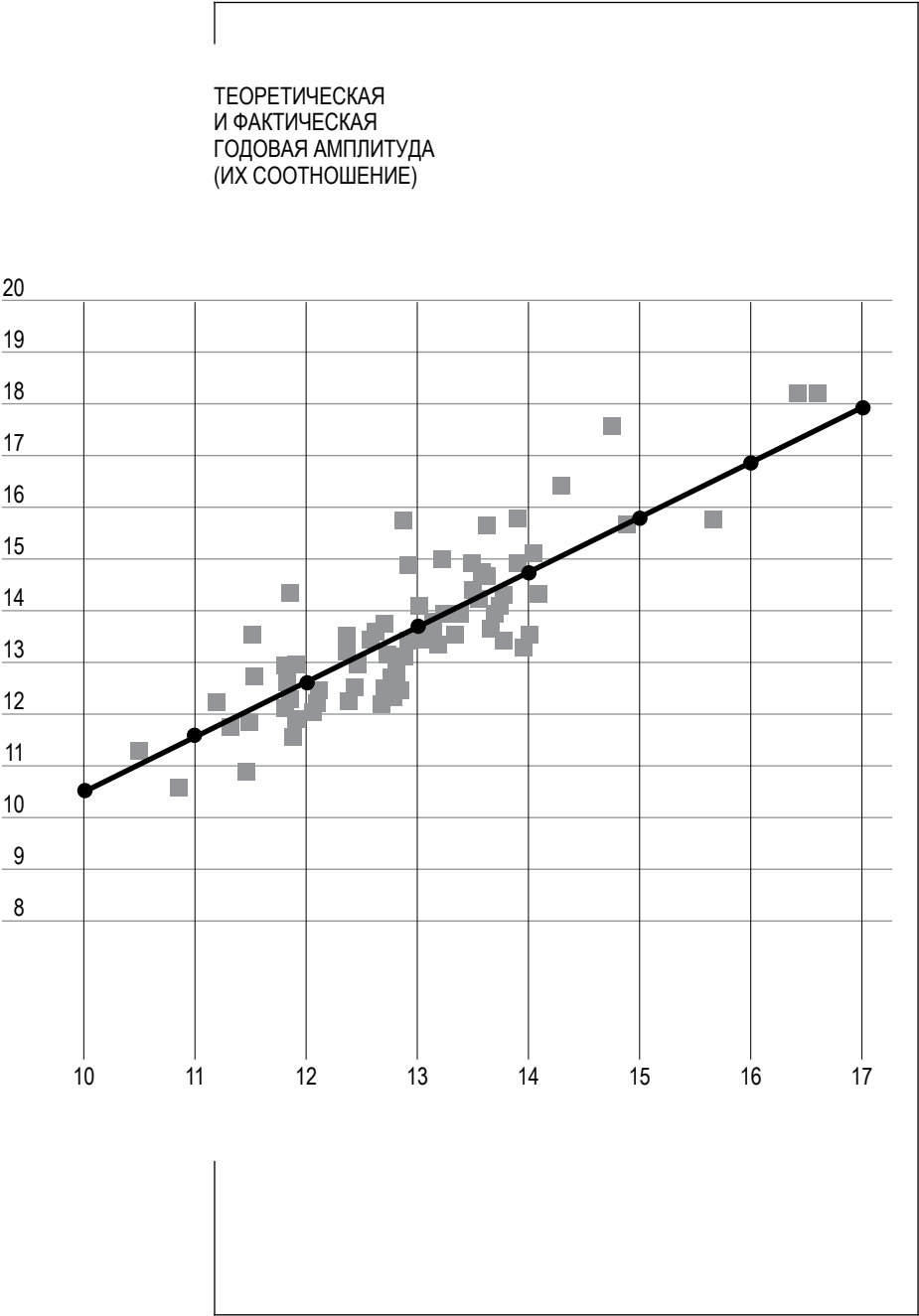


Рис. 3, б.

Соотношение теоретической (по оси OX) и фактической по оси OY) годовой амплитуды (в градусах °C).
Fig. 3, b. The ratio of the theoretical (on the OX axis) and the actual (on the OY axis) annual amplitude (in degrees °C).

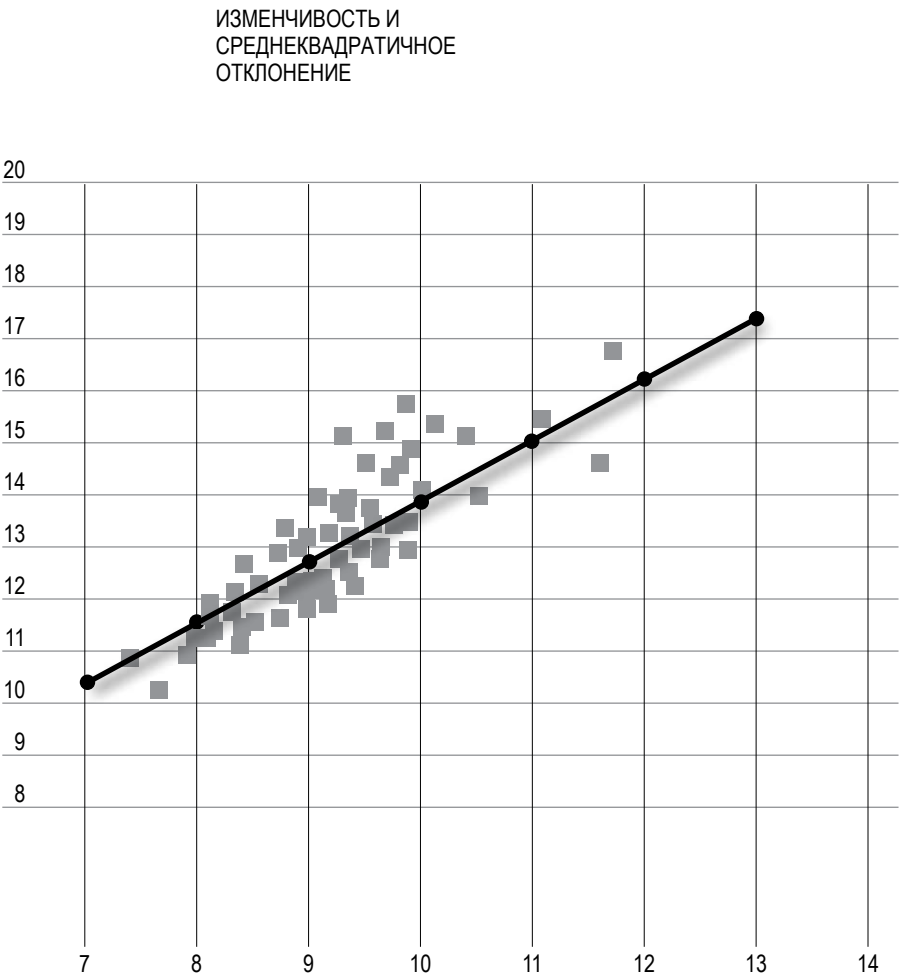


Рис. 4. Зависимость изменчивости ВР $\sigma_{\text{изм.}}$ среднемесячных значений температур от среднеквадратичного отклонения ВР $\sigma_{\text{ср.кв.}}$ (в градусах $^{\circ}\text{C}$)
Fig. 4. Dependence of the variability of TS $\sigma_{\text{изм.}}$ of monthly mean temperatures on the standard deviation of TS $\sigma_{\text{ср.кв.}}$ (in degrees $^{\circ}\text{C}$)

месяцы потепление или похолодание происходило более замедленно (ускоренно), либо когда наблюдалась (что было нечасто) инверсия межмесячных изменений температуры (например, декабрь более морозный, чем январь). Также стоит учитывать, что сдвиг фаз между максимумами и минимумами годовой температуры не всегда равен половине года, а варьируется в диапазоне 5–7 месяцев.

Другим признаком того, что годовой ход температуры близок к синусоидальному, является выполнение зависимости (6) между дисперсией (среднеквадратичным отклонением) и его коэффициентом изменчивости (рис. 4). Как было рассмотрено выше, должна быть справедливой прямая пропорциональность между этими величинами, на рисунке 4 видна похожая зависимость, причём коэффициент пропорциональности $0,59$ близок к $\omega = \frac{2\pi}{12} \approx 0,52$.

На основе данных среднемесячных значений температуры воздуха за период 1944–2022 гг. был получен график среднемноголетнего фактического годового хода температуры, который незначительно отличается от теоретического, т.е. синусоиды (рис. 5, а). Так, разница между месяцами с пиковыми значениями температуры воздуха (январём и июлем) – полгода, как и между месяцами, у которых температура примерно равна среднегодовой (апрель и октябрь).

Соответственно, получились следующие средние значения амплитуд: $T_{\text{факт}} = 12,95^\circ\text{C}$, $T_{\text{теор}} = 12,95^\circ\text{C}$, а зависимость (2), характеризующую годовой ход температуры, можно представить в виде (рис. 4):

$$T = -T_0 \cos \frac{2\pi t}{12} + \bar{T}, \quad (7)$$

где средняя за весь период наблюдений температура воздуха равна $\bar{T}_i = 9,58^\circ\text{C}$.

При сравнении среднемноголетнего годового хода температуры и его синусоидальной модели (рис. 5, а) можно заметить, что в отдельные месяцы наблюдается «запаздывание» фактического значения температуры от теоретического (табл. 1), хотя в целом графики примерно совпадают.

Также можно исследовать график годового хода температуры с помощью дискретных производных. На примере первой про-

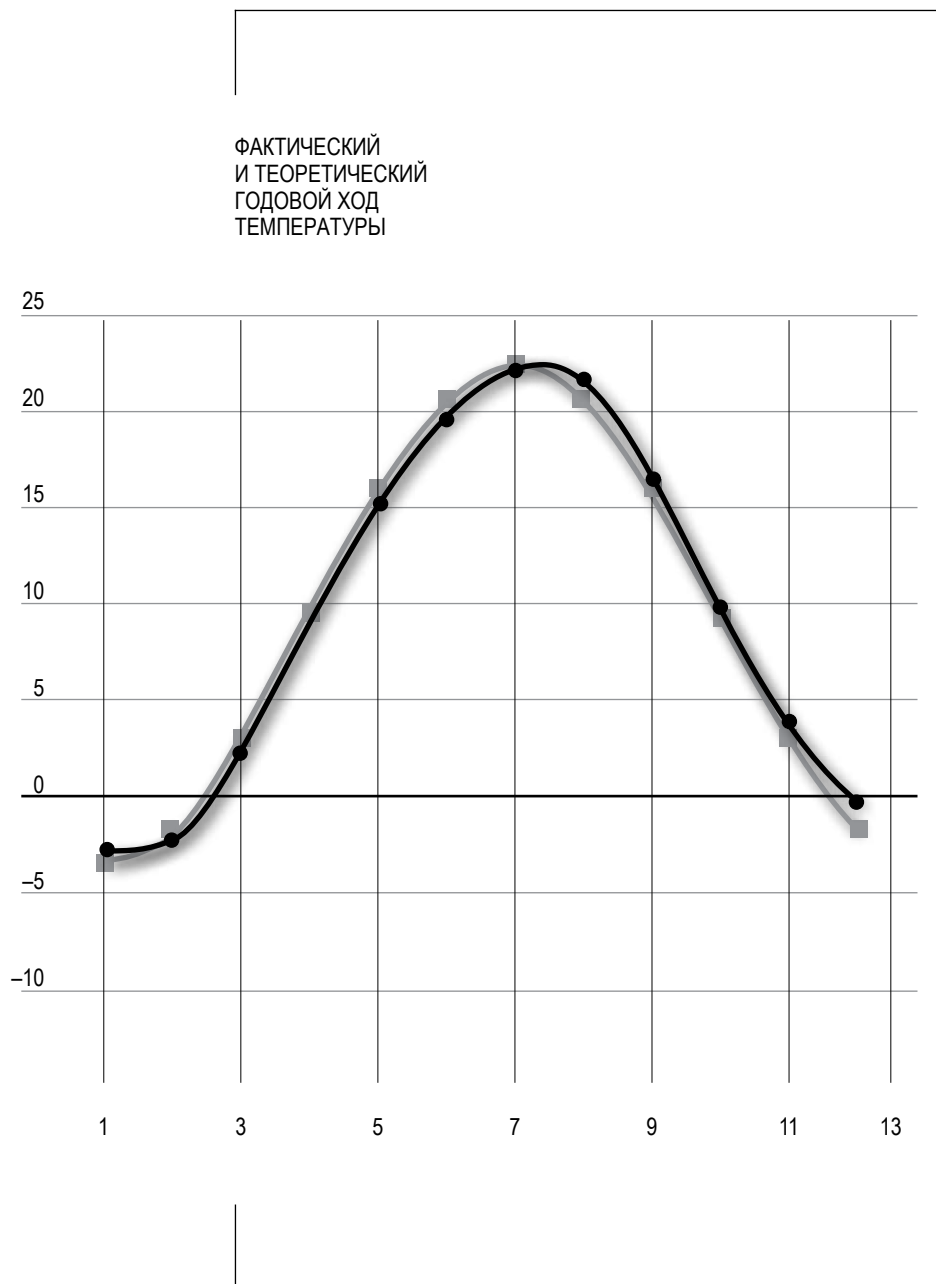


Рис. 5, а.

Среднемноголетний фактический (квадратики) и теоретический (ромбики) годовой ход температуры (в градусах °C); числа на оси ОХ соответствуют порядковым номерам месяцев.

Fig. 5, a. The average annual actual (squares) and theoretical (rhombuses) annual temperature course (in degrees °C); the numbers on the OX axis correspond to the ordinal numbers of months.

Таблица 1.

СРАВНЕНИЕ СРЕДНЕГОДОВЫХ ФАКТИЧЕСКОГО И ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ГОДОВОГО ХОДА ТЕМПЕРАТУРЫ

Table 1. Comparison of the average annual actual and theoretical annual course of temperature

Месяц	Теоретическое значение температуры	Фактическое значение температуры	Разница
Январь	−3,37	−2,71	0,656329
Февраль	−1,63	−2,16	−0,52674
Март	3,11	2,04	−1,06551
Апрель	9,58	9,56	−0,02658
Май	16,06	15,25	−0,80665
Июнь	20,80	19,49	−1,30997
Июль	22,53	22,22	−0,31076
Август	20,80	21,71	0,909022
Сентябрь	16,06	16,32	0,260443
Октябрь	9,58	9,72	0,135443
Ноябрь	3,11	3,85	0,737025
Декабрь	−1,63	−0,41	1,226421

изводной (изменчивости) мы видим максимумы (июль–август) и минимумы (январь–февраль) годового хода температур по месяцам (рис. 5, б). Отметим, что амплитуда годового хода температуры $T_{\max} = 12,47\text{ }^{\circ}\text{C}$, амплитуда её дискретной производной (изменчивости) $\Delta T_{\max} = 7\text{ }^{\circ}\text{C}$, тогда их соотношение равно 0,56, что близко к $\frac{2\pi}{12}$.

Здесь вводится вторая производная (изменчивость изменчивости годового хода температуры). По определению, функция выпуклая вверх, когда вторая производная положительная, и вниз, когда вторая производная отрицательная. Соответственно, с 1 по 4–5 месяцы график среднегодового хода температуры выпуклый вверх, с 5 по 10 месяцы — выпуклый вниз, 11–12 месяцы — выпуклый вверх, что видно на рисунке 5, б. Иначе говоря, воздух прогревает-

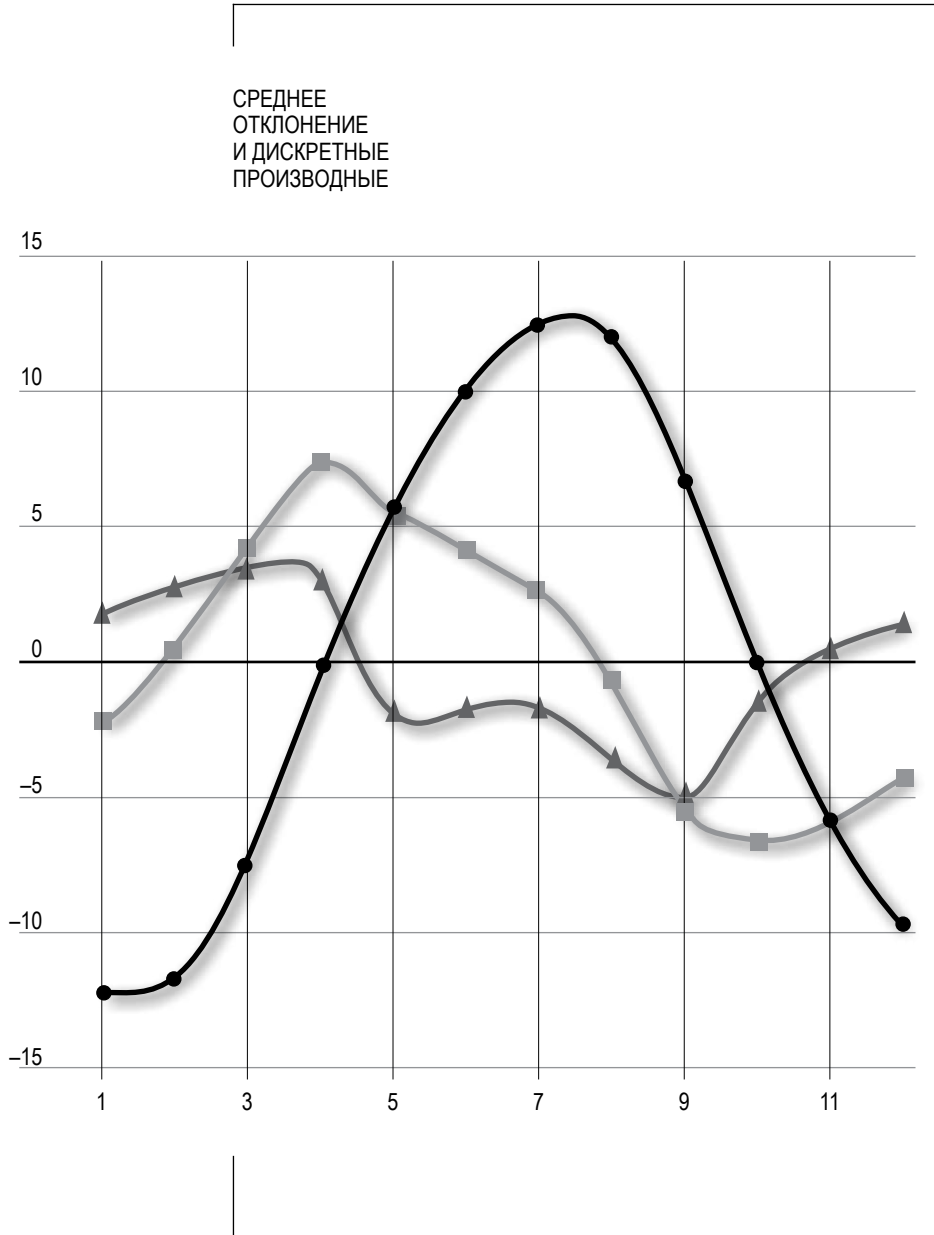


Рис. 5, б.

Средние значения по месяцам за весь период для среднего отклонения $(\bar{T}_i - \bar{T}_{\text{год}})$ — точки в виде квадратов, изменчивости $(\bar{T}_i - \bar{T}_{i-1})$ — ромбики и второй производной (изменчивость изменчивости) — стрелочки (в градусах °C).

Fig. 5, b. Monthly averages for a whole period for the mean deviation $(\bar{T}_i - \bar{T}_{\text{год}})$ are points in the form of squares, variability $(\bar{T}_i - \bar{T}_{i-1})$ is diamonds, and the second derivative (variability of variability) is arrows (in degrees °C).

ся максимально быстро в апреле, затем происходит замедление роста температуры, в июле–августе температура достигает максимума температуры и начинает ускоренно снижаться в сентябре, на начало ноября температура достигает среднегодового значения и тормозит снижение температуры, а в январе–феврале достигает минимума.

Строго говоря, графики производных всё меньше похожи на синусоидальное распределение при повышении порядка (особенно для второй производной). Это также указывает на то, что годовой ход температуры имеет всё же гораздо более сложную зависимость из-за асимметричности. Однако сравнение с элементарной (синусоидальной) моделью позволило выявить особенности изменчивости годового хода температуры по месяцам.

Выводы

При анализе внутригодовой изменчивости температуры приземного воздуха проведено сопоставление годового хода температуры с элементарной (синусоидальной) моделью. Рассчитана дисперсия для каждого года по месяцам, что позволило найти ежегодные сезонные колебания. Вводится теоретическая амплитуда годового хода температуры, которая может быть представлена в виде соотношения $T_{0\text{теор.}} = \sqrt{2}\sigma$. В работе рассмотрены также дискретные производные первого и второго порядка (ряды разностей среднемесячных температур, т.е. изменчивости, и разность разности соответственно).

Показано, что использование элементарной модели допустимо при рассмотрении годового хода температуры (на примере средних показателей за период 1944–2021 гг.), т.е., в общем, изменение температуры по месяцам имеет распределение, близкое к синусоидальному, с годовой периодичностью. На это указывает то, что соотношение амплитуд фактического годового хода температуры и её межмесячной изменчивости (дискретной производной) примерно равно $\omega \left(\frac{2\pi}{T} \right)$, где T — 12 месяцев), аналогичное соотношение (6) выполняется для среднеквадратичного отклонения $\sigma_{\text{ср.кв.}}$ и его коэффициента изменчивости $\sigma_{\text{изм.}}$.

Недостатком этой модели является то, что реальный график годового хода температуры асимметричен. Соответственно, также получен график среднемноголетней внутригодовой изменчивости температуры, который сравнивается с синусоидой. Это позволило

выявить отличительные особенности годового хода температуры, заключающиеся в том, что в отдельные месяцы потепление или похолодание происходило более замедленно (ускоренно). Кроме того, нередко разница между соседними месяцами, имеющими пиковые значения температур, достигает 5 или 7 месяцев вместо полугода, либо была заметной разность между фактической и теоретической годовой амплитудой, что усиливало асимметричность графика внутригодовой изменчивости. В исключительных случаях наблюдалась инверсия изменений межмесячных температур, т.е. декабрь был более морозный, чем январь, либо июль был прохладнее, чем июнь, что связано с особенностями атмосферных циркуляций в отдельные годы.

В целом закономерности, выявленные при рассмотрении сезонных отклонений, могут быть интересны с точки зрения климатологии. Также рассмотрен характер изменения температуры приземного воздуха по месяцам, для этого были найдены значения дискретных производных, использование которых может оказаться полезным в области метеорологии при рассмотрении внутригодового хода температуры воздуха как для г. Ставрополя, так и для других регионов.

Библиографический список

1. Афанасьев И.С., Комарова А.Р., Закинян Р.Г., Шевченко А.И. Парниковый эффект / под ред. Р. Г. Закиняна // Проблемы физики атмосферы, климатологии и мониторинга окружающей среды: доклады IV международной научной конференции (Ставрополь, 23–25 мая 2022 г.). Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2022. 256 с.
2. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Кешева Л.А., Теунова Н.В. Изменения температурного режима и режима осадков теплого и холодного периодов в различных климатических зонах Северо-Кавказского региона // Наука. Инновации. Технологии. 2021. № 3. С. 55–72.
3. Витязев В. В. Вейвлет-анализ временных рядов: учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2001. 58 с.
4. Волкова В.И., Бадахова Г.Х., Барекова М.В., Каплан Г.Л. Особенности атмосферной циркуляции переходного периода и колебания дат начала весны в Центральном Предкавказье // Наука. Инновации. Технологии. 2021. № 1. С. 125–138.

5. Волкова В.И., Бадахова Г.Х., Кравченко Н.А., Каплан Г.Л. Динамика и современный температурный режим календарного лета на ставропольской возвышенности // Наука. Инновации. Технологии. 2020. № 4. С. 149–160.
6. Глотова М. Ю. Математическая обработка информации: учебник и практикум для вузов / М.Ю. Глотова, Е.А. Самохвалова. 3-е изд., испр. и доп. Москва: Изд-во «Юрайт», 2023. 301 с.
7. Елисеева И.И. Статистика: учебник / И.И. Елисеева и др. Москва: Проспект, 2015. 443 с.
8. Задорожная Т. Н. Выявление циклических колебаний в полях аномалий температуры воздуха на Европейской территории / Т.Н. Задорожная, В.П. Закусилов // Science Time. 2016. № 3 (27). С. 180–186.
9. Иванова Т.В. Численные методы в оптике: учебное пособие. СПб.: Ун-т ИТМО, 2017. 84 с.
10. Кизбикенов К.О. Прогнозирование и временные ряды: учебное пособие. Барнаул: АлтГПУ, 2017. 113 с.
11. Кричевский М.Л. Временные ряды в менеджменте. Ч. 1: монография / М.Л. Кричевский. М.: Русайнс, 2016. 220 с.
12. Лапина Л.Э. Анализ изменения температуры воздуха и суммы осадков по данным метеостанций Старица и Тверь за многолетний период / Л.Э. Лапина, И.Л. Григорьева // Вестник Тверского государственного университета. Серия: География и геоэкология. 2020. № 3 (31). С. 57–78.
13. Митрова Т., Хохлов А., Мельников Ю. Глобальная климатическая угроза и экономика России: в поисках особого пути. Сколково: Центр энергетики Московской школы управления, 2020. 69 с.
14. Назаркин Н.С. Анализ временных рядов методом сингулярного спектрального анализа: магистерская диссертация: 27.04.03 / Н.С. Назаркин. Красноярск: СФУ, 2018. 51 с.
15. Отнес Р. К., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы / пер. с англ. В. И. Хохлова; под ред. И. Г. Журбенко. М.: Наука, 1982. 428 с.
16. Рогозин М. Ю. Чем опасен парниковый эффект / М.Ю. Рогозин, Д.С. Иванченко // Молодой ученый. 2017. № 51 (185). С. 120–124.
17. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы: учебное пособие для вузов. М.: Наука; Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 432 с.
18. Семенов С.М. Сравнительные оценки влияния изменения концентраций диоксида углерода, метана, закиси азота и

водяного пара на радиационно-равновесную температуру земной поверхности / С. М. Семенов, И. О. Попов // Метеорология и гидрология. 2011. № 8. С. 34–33.

19. Ташилова А. А. Прогноз летних температур методом сингулярно-спектрального анализа на юге России в 2019–2023 гг. / А. А. Ташилова, Б. А. Ашабоков, Л. А. Кешева, Н. В. Теунова // Наука. Инновации. Технологии. 2020. № 2. С. 115–134.
20. Хованова Н. А., Хованов И. А. Методы анализа временных рядов / Н. А. Хованова, И. А. Хованов. Саратов: ГосУНЦ Колледж, 2001. 119 с.

References

1. Afanasiev I. S., Komarova A. R., Zakinyan R. G., Shevchenko A. I. Greenhouse effect. Problems of Atmospheric Physics, Climatology and Environmental Monitoring: Reports of the IV International Scientific Conference (Stavropol, May 23–25, 2022); ed. R. G. Zakinyan. Stavropol: Publisher NCFU, 2022. 256 p.
2. Ashabokov B. A., Fedchenko L. M., Kesheva L. A., Teunova N. V. Changes in the temperature regime and precipitation regime of the warm and cold periods in various climatic zones of the North Caucasus region. *Nauka. Innovation. Technologies*. 2021. No. 3. P. 55–72.
3. Vityazev V. V. Wavelet analysis of time series: Proc. allowance. St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg State University, 2001. 58 p.
4. Volkova V. I., Badakhova G. Kh., Barekova M. V., Kaplan G. L. Peculiarities of the atmospheric circulation of the transitional period and fluctuations in the dates of the beginning of spring in the Central Ciscaucasia // *Nauka. Innovation. Technologies*. 2021. No. 1. P. 125–138.
5. Volkova V. I., Badakhova G. Kh., Kravchenko N. A., Kaplan G. L. Dynamics and modern temperature regime of the calendar summer on the Stavropol Upland. *The science. Innovation. Technologies*. 2020. No. 4. P. 149–160.
6. Glotova M. Yu., Samokhvalova E. A. Mathematical processing of information: textbook and workshop for universities. - 3rd ed., Rev. and additional. Moscow: Yurayt Publishing House, 2023. 301 p.
7. Eliseeva I. I. Statistics: textbook. I. I. Eliseeva and others. Moscow: Prospekt, 2015. 443 p.

8. Zadorozhnaya T. N., Zakusilov V. P. Detection of cyclic fluctuations in the fields of air temperature anomalies in the European territory. *Science Time*. 2016. No. 3 (27). P. 180–186.
9. Ivanova T.V. Numerical methods in optics. Tutorial. St. Petersburg: ITMO University, 2017. 84 p.
10. Kizbikenov K. O. Forecasting and time series: a tutorial. Barnaul: AltSPU, 2017. 113 p.
11. Krichevsky M.L. Time series in management. Part 1: monograph. M.L. Krichevsky. M.: Rusayns, 2016. 220 p.
12. Lapina L.E., Grigorieva I.L. Analysis of changes in air temperature and precipitation according to the data of the weather stations Staritsa and Tver for a long period. *Bulletin of Tver State University. Series: Geography and Geoecology*. 2020. No. 3 (31). P. 57–78.
13. Mitrova T., Khokhlov A., Melnikov Yu. Global climate threat and the Russian economy: in search of a special way. Skolkovo: Energy Center of the Moscow School of Management, 2020. P. 69.
14. Nazarkin N. S. Analysis of time series by the method of singular spectral analysis: master's thesis: 27.04.03. N.S. Nazarkin. Krasnoyarsk: SFU, 2018. 51 p.
15. Otnes R. K., Enokson L. Applied analysis of time series. Basic methods. M.: Nauka, 1982. (translated from English by V. I. Khokhlov; edited by I. G. Zhurbenko). 428 p.
16. Rogozin M. Yu. Why is the greenhouse effect dangerous / M. Yu. Rogozin, D. S. Ivanchenko. *Young scientist*. 2017. No. 51 (185). P. 120–124.
17. Samarsky A. A., Gulin A. V. Numerical methods: Textbook, manual for universities. M.: Nauka. Ch. ed. physics and mathematics lit., 1989. 432 p.
18. Semenov S. M., Popov I. O. Comparative estimates of the effect of changes in the concentrations of carbon dioxide, methane, nitrous oxide and water vapor on the radiation-equilibrium temperature of the earth's surface. S. M. Semenov, I. O. Popov. *Meteorology and Hydrology*. 2011. No. 8. P. 34–33.
19. Tashilova A.A., Ashabokov B.A., Kesheva L.A., Teunova N.V. Forecast of summer temperatures by the method of singular spectral analysis in the south of Russia in 2019-2023. *The science. Innovation. Technologies*. 2020. No. 2. P. 115–134.
20. Khovanova N. A., Khovanov I. A. Methods of analysis of time series. Saratov: GosUNTS College, 2001. 119 p.

Статья поступила в редакцию 24.04.2023,
статья одобрена после рецензирования 25.08.2023,
статья принята к публикации 10.09.2023.

The article was submitted to the editorial office 24.04.2023,
the article was approved after reviewing 25.08.2023,
the article was accepted for publication 10.09.2023.

Информация об авторах

Закинян Роберт Гургенович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теоретической и математической физики, физико-технический факультет, Северо-Кавказский федеральный университет.

E-mail: zakinyan@mail.ru

Афанасьев Игорь Сергеевич, студент направления 03.04.02 Физика, физико-технический факультет, Северо-Кавказский федеральный университет. E-mail: afanasevigor278@gmail.com.

Аджиева Аида Анатольевна, доктор физико-математических наук, профессор кафедры высшей математики, Высокогорный геофизический институт, Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова.

e-mail: aida-adzhieva@mail.ru.

Information about the authors

Robert G. Zakinyan, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Department of Theoretical and Mathematical Physics Faculty of Physics and Technology, North-Caucasus Federal University.

E-mail: zakinyan@mail.ru.

Igor S. Afanasyev, Student, 03.04.02 Physics, Faculty of Physics and Technology, North-Caucasus Federal University.

E-mail: afanasevigor278@gmail.com.

Aida A. Adzhieva, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Higher Mathematics, High-Mountain Geophysical Institute, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.

E-mail: aida-adzhieva@mail.ru.