



УДК 551.584.5/.6;551.588.7551.583

© 2012

Л. А. Ковальчук, О. Я. Скриник

Риски потепления и вероятности аномалий среднемесячной температуры воздуха в Киеве по одноградусным диапазонам за вековой период

(Представлено членом-корреспондентом НАН Украины В. И. Осадчим)

Исследованы особенности поведения аномалий среднемесячной температуры воздуха в Киеве за вековой период и выявлена цикличность смены законов их статистических распределений. Вычислены риски и установлен предел потепления, не превышающий 3 °С относительно климатической нормы. Рассчитаны вероятности аномалий температуры по одноградусным диапазонам. Падение вероятностей в диапазоне аномалий от 0 °С до 1 °С на протяжении 1991–2010 гг. и уменьшение риска потепления к 2010 г. рассматриваются как слабый признак уменьшения интенсивности потепления.

Актуальность проблемы. Многолетняя дискуссия о “глобальном потеплении климата” продемонстрировала ограниченность традиционных подходов к изучению его динамики, которые основываются преимущественно на выявлении тенденций изменений “среднего” значения температуры воздуха, но при этом не обсуждается вопрос об усилении или ослаблении процесса потепления.

В предлагаемом авторами исследовании *климат* рассматривается как “статистический ансамбль” состояний, который проходит климатическая система за период времени, равный нескольким десятилетиям [1]. Аналогичное, по сути, определение дано в рекомендациях Всемирной метеорологической организации [2]: *климат* — это синтез погодных условий данного региона, характеризуемый долгосрочными статистическими данными (*средние значения, дисперсии, вероятности экстремальных величин* и т. д.) метеорологических элементов или явлений в этом регионе. Следовательно, традиционно оценивая поведение только средних по времени значений метеорологических параметров, на самом деле оценивается поведение всего лишь некоторой “средней” реализации из “статистического ансамбля” реализаций климата.

В связи с этим, целью нашей работы было определение особенностей местного потепления, рассматривая временной ход температуры воздуха как случайный нестационарный

процесс, выборочно оценивая плотность вероятности аномалий среднемесячной температуры воздуха за вековой период. Основанием для такого подхода послужили определения климата в научных публикациях [1, 2]. Очевидно, что временная динамика плотности вероятностей аномалий температуры будет более полно отражать климатические изменения температурного режима, нежели временная динамика только средней температуры.

Материал наблюдений и методика исследований. В качестве экспериментальных данных использованы среднемесячные значения температуры воздуха в Киеве, полученные Гидрометеорологической службой Украины по результатам стандартных ежедневных наблюдений в синоптические сроки за период 1900–2010 гг. Среднемесячные значения температуры воздуха были очищены от детерминированной составляющей — годового хода. Из значений среднемесячной температуры воздуха вычитались среднемноголетние значения температуры соответствующего месяца. Временной ход полученных аномалий (Δt , °C) рассматривался как отдельная реализация “нестационарного случайного” климатического процесса. Известно, что существуют принципиальные трудности в получении других реализаций, образующих “статистический ансамбль”. В современной теории вероятностей только для стационарных и эргодических процессов удается получить корректные результаты на основании анализа одной реализации. Для случайных нестационарных процессов часто используют так называемый оконный подход [3]. В этом случае постулируется, что в рамках окна “нестационарная случайная” функция обладает некоторым аналогом эргодичности стационарных процессов. Для климатологических параметров это свойство предполагается определениями климата [1, 2], что позволило нам, используя “оконный подход”, рассчитать выборочные плотности вероятностей аномалий температуры воздуха.

Методическая часть исследования включала следующие этапы.

На первом этапе была исследована в скользящем режиме изменчивость во времени аномалий температуры воздуха по математическому ожиданию, стандартному отклонению, эксцессу, эксцентриситету [2]. При скользящих оценках для минимизации выборочных флуктуаций статистик использовались интервалы временного ряда (окна), равные 120-ти и 180-ти значениям, что соответствует 10-, 15-летним периодам.

На втором этапе для объективного выбора оптимального “окна” по 10-, 15-летним периодам идентифицированы законы статистических распределений аномалий температуры посредством аналитической модели, описывающей широкий класс выпуклых экспоненциальных распределений [4]:

$$p(x, t) = \frac{\alpha}{2\lambda\sigma\Gamma(1/\alpha)} \exp\left(-\left|\frac{x-m}{\lambda\sigma}\right|^\alpha\right). \quad (1)$$

Здесь $\lambda = \sqrt{\frac{\Gamma(1/\alpha)}{\Gamma(3/\alpha)}}$, где $\Gamma(z)$ — гамма-функция ($\Gamma(z) = \int_0^\infty e^{-t} t^{z-1} dt$ при $\text{Re } z > 0$); $\sigma = \sigma(t)$ — стандартное отклонение; $m = m(t)$ — центр распределения; $\alpha = \alpha(t)$ — некоторая характеристика распределения, которая однозначно определяет параметр формы экспоненциальных распределений — эксцесс (ε):

$$\varepsilon = \frac{\Gamma(1/\alpha)\Gamma(5/\alpha)}{(\Gamma(3/\alpha))^2}. \quad (2)$$

Если $\alpha < 1$, то модель (1) описывает распределения, близкие по своим свойствам распределению Коши; $\alpha = 1$ — модель представляет распределение Лапласа, имеющее более

островершинный вид, чем у нормального распределения; $\alpha = 2$ — модель соответствует нормальному распределению; $\alpha > 2$ — модель идентифицирует распределения, близкие по своим свойствам к трапецидальным распределениям; $\alpha \rightarrow \infty$ — модель отражает равномерное распределение.

Затем была проверена нулевая гипотеза об отсутствии статистически значимых различий между плотностями вероятностей, вычисленных по 10-, 15-летним периодам. Изменения законов статистических распределений аномалий за вековой период исследованы посредством параметра α .

На третьем этапе выборочно по 10-летним периодам для описания динамики интенсивности потепления на протяжении века рассчитаны значения функции риска [5], которую следует преобразовать так:

$$h(x, k) = \frac{p(x, k)}{F(x, k)}, \quad (3)$$

где $p(x, k)$ и $F(x, k)$ — выборочные значения плотности вероятностей и функции распределения, рассчитанные при $x = x_{в.н} + 1, x_{в.н} + 2, x_{в.н} + 3, x_{в.н} + 4$, а $x_{в.н}$ — значение вековой нормы аномалий среднемесячной температуры; k — время.

На четвертом этапе для анализа статистической структуры потепления определяли, посредством функции распределения, вероятности аномалий среднемесячной температуры воздуха по одноградусным диапазонам.

Результаты исследования и их обсуждения. Размах аномалий среднемесячной температуры воздуха находился в пределах от $-11,3$ °C до $+8,1$ °C. В первой половине прошлого века скользкие значения по десятилетиям средних аномалий температуры опускались до $-0,6$ °C, а в продолжение второй половины века плавно увеличились, достигнув $+1,4$ °C в последнее десятилетие. Выборочные различия законов статистических распределений по 10-, 15-летним периодам оказались статистически не значимы (табл. 1). Следовательно, при длине временных рядов (“окон”), равной 120-ти или 180-ти значениям, минимизация выборочных флуктуаций статистик осуществляется в достаточной мере, чтобы значимо не проявляться на выборочных значениях плотностей вероятностей.

Таблица 1. Коэффициент корреляции между плотностью вероятностей $p(x)$ аномалий среднемесячных температур воздуха по 10-, 15-летним периодам

Период, годы	Коэффициент корреляции	Период, годы	Коэффициент корреляции
1901–1910	0,999	1951–1960	0,998
1901–1915		1951–1965	
1911–1920	0,998	1961–1970	0,990
1911–1925		1961–1975	
1921–1930	0,997	1971–1980	0,988
1921–1935		1971–1985	
1931–1940	0,980	1981–1990	0,999
1931–1945		1981–1995	
1941–1950	0,998	1991–2000	0,995
1941–1955		1991–2005	

Примечание. Критическое значение выборочного коэффициента корреляции $r_{\alpha=1\%, n_x=85} = 0,280$ [6, с. 198], $r_{n_x=85}$ значим при $r_{n_x=85} > r_{\alpha=1\%, n_x=85}$ и $r_{n_x=85}$ незначим при $r_{n_x=85} \leq r_{\alpha=1\%, n_x=85}$ ($n_x = 85$ — число значений x , для которых идентифицируется $p(x)$).

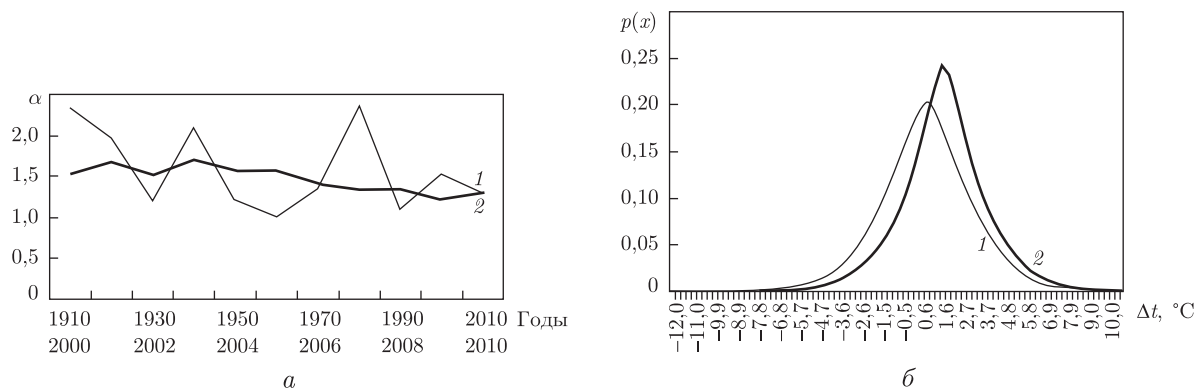


Рис. 1. Статистические характеристики аномалий среднемесячной температуры воздуха в Киеве: *а* — динамика параметра формы распределения α за периоды: 1910–2010 гг. (1) и 2000–2010 г. (2); *б* — плотность вероятностей $p(x)$ (законы статистических распределений) за 2000 г. (1) и 2010 г. (2)

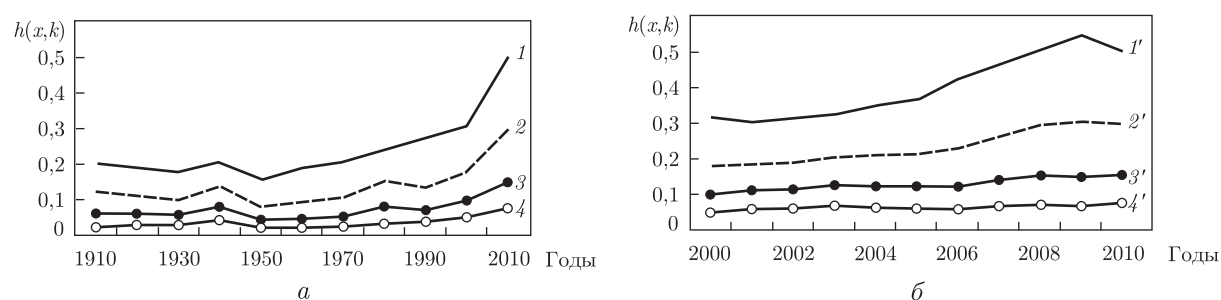


Рис. 2. Динамика функции риска потепления $h_{(x,k)}$ на 1 °C (1, 1'), 2 °C (2, 2'), 3 °C (3, 3'), 4 °C (4, 4') относительно климатической нормы за периоды: 1910–2010 гг. (а); 2000–2010 гг. (б)

Изменениям плотности вероятностей во времени за вековой период присуща нерегулярная цикличность, очевидная на примере параметра α (рис. 1, *а*), что, в свою очередь, связано с изменениями формы статистических распределений (см. рис. 1, *б*) и отражается на интенсивности потепления. Функция риска потепления относительно климатической нормы, вычисленная выборочно с интервалом в десятилетие, в первой половине прошлого века имела тенденцию к уменьшению (рис. 2, *а*), а во второй половине — ее значения явно увеличивались и особенно в последнее десятилетие (2000–2010 гг.). Примечательно, что риски потепления на 4 °C или на 3 °C на протяжении века изменялись мало, оставаясь существенно ниже рисков потепления на 2 или 1 °C. Функция риска потепления за последнее десятилетие, вычисленная выборочно с интервалом в один год (см. рис. 2, *б*), обнаружила уменьшение интенсивности потепления на 1 °C к 2010 г. относительно 2009 г. и ослабление интенсивности потепления на 2, 3 и 4 °C. Как и следовало ожидать, смещение центра статистического распределения аномалий температур в положительную область в 2010 г. относительно центра распределения в 2000 г. (см. рис. 1, *б*) является менее значимым для функции риска, чем уменьшение значений параметра α , соответствующее обострению формы распределения (см. рис. 1, *а*), в результате чего вместо ожидаемого роста происходило уменьшение интенсивности потепления к 2010 г.

Изменения формы законов статистических распределений во времени обуславливают изменения в значениях и тенденциях вероятностей аномалий температуры по одноградусным диапазонам (рис. 3). Для прохладного периода первой половины прошлого века ха-

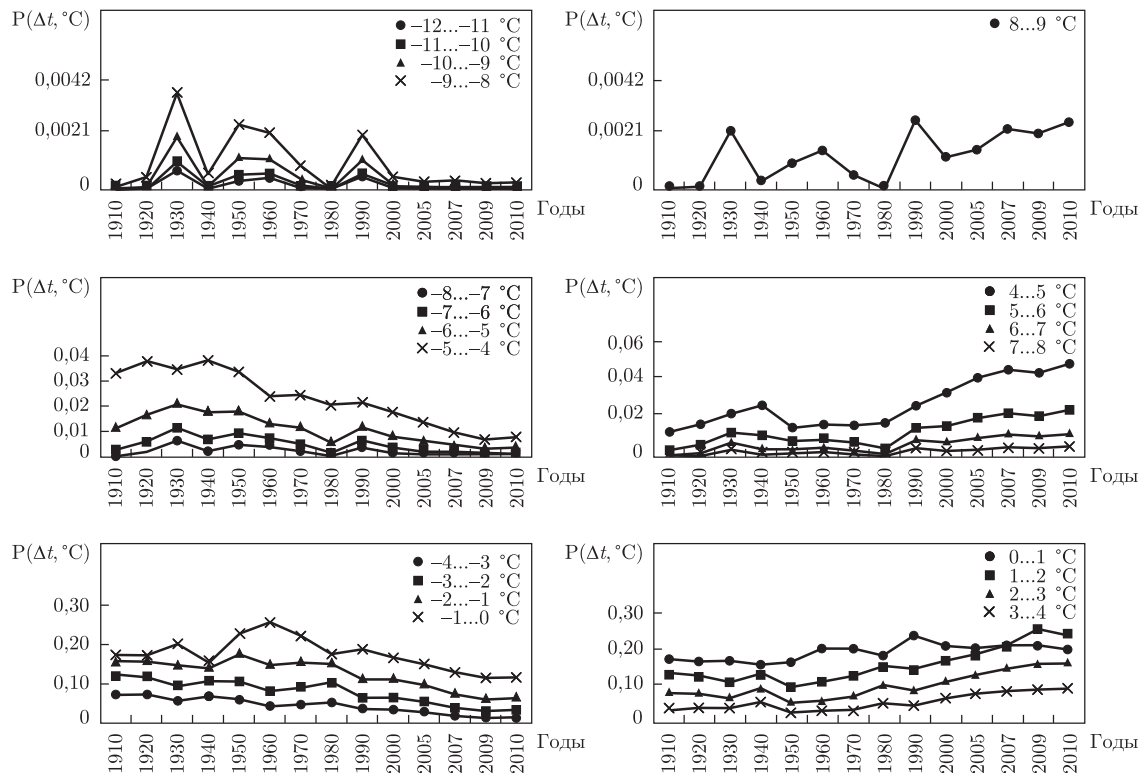


Рис. 3. Вероятности аномалий среднемесячной температуры воздуха в Киеве за период 1910–2010 гг. по одноградусным диапазоном: от $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$, ..., от $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $9\text{ }^{\circ}\text{C}$

рактерно доминирование вероятностей отрицательных аномалий, а со второй половины происходит рост вероятностей положительных аномалий температуры воздуха. При этом в крайних диапазонах аномалий температур вероятности аномалий незначительные и колеблются от $1 \cdot 10^{-3}$ до $2 \cdot 10^{-8}$, но к центру распределения колебания существенно уменьшаются, а значения вероятностей возрастают, достигая значений от $0,2 \cdot 10^{-1}$ до $2,3 \cdot 10^{-1}$ в интервале аномалий температур от $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Вопреки очевидным тенденциям изменений вероятностей аномалий температуры, нами отмечены исключения. В частности, в период потепления во второй половине века наблюдалось уменьшение вероятностей аномалий температур в диапазоне от $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ на протяжении 1990–2010 гг. (см. рис. 3).

Таким образом, согласно результатам проведенных исследований было установлено, что размах аномалий среднемесячной температуры воздуха в Киеве находился в пределах от $-11,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+8,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. В первой половине прошлого века скользящие значения средних по десятилетиям аномалий температуры опускались до $-0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в продолжение второй половины века плавно увеличились, достигнув $+1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ в последнее десятилетие. Изменениям плотностей вероятностей во времени за вековой период присуща нерегулярная цикличность, что, в свою очередь, связано с изменениями формы распределения статистических распределений и отражается на интенсивности потепления. Функция риска потепления относительно климатической нормы в первой половине прошлого века имела тенденцию к уменьшению, а во второй половине — ее значения явно увеличивались. Риски потепления на $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ или на $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ на протяжении века изменялись мало, оставаясь существенно ниже рисков

потепления на 2 или 1 °С. Вычисленные значения функции риска потепления позволили установить уменьшение интенсивности потепления на 1 °С в 2010 г. относительно 2009 г. Падение вероятностей аномалий температуры воздуха в диапазоне от 0 °С до 1 °С в период 1991–2010 гг. и уменьшение риска потепления к 2010 г. рассматриваются как слабый признак уменьшения интенсивности потепления.

1. Монин А. С. История климата. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1979. – 376 с.
2. *Международный метеорологический словарь*, № 182. – Женева: Всемирн. метеор. орг-ния, 1992. – 784 с.
3. Бялко А. В., Гамбургцев А. Г. Статистика погоды // Природа. – 2000. – № 12. – С. 6–12.
4. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
5. Хастингс Н., Пикок Дж. Справочник по статистическим распределениям. – Москва: Статистика, 1980. – 95 с.
6. Урбах В. Ю. Статистический анализ в биологических и медицинских исследованиях. – Москва: Медицина, 1975. – 295 с.

*Украинский научно-исследовательский
гидрометеорологический институт
НАН Украины и МЧС Украины, Киев*

Поступило в редакцию 03.06.2011

Л. А. Ковальчук, О. Я. Скриник

Ризики потепління та ймовірності аномалій середньомісячної температури повітря в Києві по одноградусних діапазонах за віковий період

Досліджено особливості поведінки аномалій середньомісячної температури повітря в Києві за віковий період та виявлено циклічність зміни законів їх статистичних розподілів. Обчислено ризики та встановлено межу потепління, що не перевищує 3 °С відносно кліматичної норми. Розраховано ймовірності аномалій температури по одноградусних діапазонах. Падіння ймовірностей в діапазоні аномалій від 0 °С до 1 °С впродовж 1991–2010 рр. і зменшення ризику потепління до 2010 р. розглядаються як слабка ознака зменшення інтенсивності потепління.

L. A. Kovalchuk, O. Y. Skrynyk

Warming risk and probability of monthly air temperature anomalies on the one-degree scale in Kyiv during the last century

We have studied features of monthly air temperature anomalies in Kyiv during the last century and have revealed the cyclic change of their probability (statistical) distribution. Warming risks have been also calculated, and a limit of warming that is less than 3 °C relative to a climatic norm has been defined. Probabilities of air temperature anomalies on the one-degree scale have been calculated as well. The decrease of probabilities in a range from 0 to 1 degree during the period 1991–2010 and the decrease of warming risks are considered as a weak indicator of a decrease of the warming rate.