

Л. А. Ковальчук

Оценивание состояния местного климата двумерным законом статистических распределений аномалий температуры воздуха и атмосферных осадков на примере Киева

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

Предложен алгоритм оценки состояния климата посредством двумерной плотности вероятностей аномалий температуры воздуха и количества атмосферных осадков. Доминирующим в районе Киева является климат с нормальной температурой и осадками в пределах нормы, сопровождающийся ростом частоты теплых типов и уменьшением частоты холодных сухих типов климата. Энтропия вероятностей типов климата колеблется в пределах 48–63% климатического хаоса и обнаруживает слабый признак стабилизации климата в области его нормальных состояний.

Актуальность проблемы. Противоречивые предсказания климата обусловлены, прежде всего, отсутствием его строгой теории, разработка которой невозможна без количественного оценивания состояния климата. В то же время решение проблемы заключено в определении климата как “статистического ансамбля” состояний [1] или, что равнозначно, как синтез погодных условий рассматриваемого района, характеризующегося долгосрочными статистическими данными метеорологических элементов или явлений в этом районе [2].

Целью данного исследования является определение состояния местного климата посредством многомерного закона статистического распределения его параметров. Для указанного оценивания нет математических ограничений, но неизбежны сложности при интерпретации результатов. Прибегнув к снижению размерности [3], оценивание состояния климата на протяжении века осуществлено на основе только двух важнейших его параметров: температуры воздуха и количества атмосферных осадков, для этого привлечена двумерная плотность вероятности их аномалий.

Материал и методика. В качестве экспериментального материала использованы среднемесячные значения температуры воздуха и месячные суммы осадков в Киеве, полученные Гидрометеорологической службой Украины по результатам стандартных ежедневных наблюдений в синоптические сроки за период с 1900 по 2010 гг.

Среднемесячные значения температуры воздуха и месячные суммы осадков были “очищены” от детерминированной составляющей: годового хода. Из указанных значений вычитались среднемноголетние значения температуры воздуха и месячной суммы осадков соответствующего месяца. Временной ход полученных аномалий рассматривался, как отдельная реализация “нестационарного случайного” климатического процесса. Учитывая принципиальные трудности в получении других реализаций, образующих “статистический ансамбль”, осуществлен “поток экспериментов” [4], т. е. рассчитаны скользящие двумерные плотности вероятностей аномалий температуры воздуха и аномалий месячных сумм осадков.

Методическая часть исследования включала следующие этапы.

На *первом* этапе в скользящем режиме были вычислены значения математического ожидания, стандартного отклонения, эксцесса, эксцентриситета временных рядов месячных аномалий температуры воздуха и аномалий месячных сумм осадков. Для скользящей минимизации выборочных флуктуаций статистик использован пятилетний период, что соответствует 60-ти значениям временного ряда. Затем по скользящим пятилетним выборкам была проверена гипотеза о статистической независимости аномалий среднемесячной температуры воздуха и аномалий месячных сумм осадков, принятая на 1%-м уровне значимости, что свидетельствует об отсутствии статистически значимой зависимости между аномалиями среднемесячной температуры воздуха и аномалиями месячных сумм осадков.

На *втором* этапе проведен анализ статистических распределений скользящих по пятилеткам месячных аномалий температуры воздуха и аномалий месячных сумм осадков. Установлено, что статистические распределения скользящих пятилетних выборок аномалий температуры воздуха в основном симметричны, а статистические распределения скользящих пятилетних выборок аномалий месячных сумм осадков зачастую усечены слева. Обусловлено это тем, что частота, интенсивность и обилие осадков в холодное время года ниже, чем в теплое. В этой связи возник вопрос, какую аналитическую модель выбрать для описания статистических распределений аномалий месячных сумм осадков? Если принять усеченную модель осадков, то будет законсервирован их современный режим, т. е. будет исключена вероятность симметрии осадков холодного и теплого времени года, которая возможна вследствие изменений климата. Очевидно, что при увеличении частоты, интенсивности и обилия осадков холодного времени года до уровня теплого необходима симметричная модель; так же, как и при уменьшении частоты, интенсивности и обилия осадков теплого времени года до уровня холодного, необходима тоже симметричная модель. Но возможны и такие изменения климата, когда частота, интенсивность и обилие осадков теплого и холодного времени года будут ослабевать и когда периодически в течение месяца осадков не будет. В таком случае современный усеченный закон статистического распределения осадков будет “приобретать” так называемый хвост в области нуля, который будет возрастать по мере усиления засухи. Аналитическое моделирование таких распределений представляет значительные трудности. В этой связи нами принята симметричная модель, а возникающие при этом отрицательные значения ненормированных осадков рассматривались как дефицит осадков (единица измерения в мм).

Законы статистических распределений аномалий температуры воздуха и атмосферных осадков по скользящим пятилетним выборкам идентифицированы посредством аналитической модели, описывающей широкий класс выпуклых симметричных экспоненциальных распределений [5]:

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

где $\lambda = \sqrt{\frac{\Gamma(1/\alpha)}{\Gamma(3/\alpha)}}$, $\Gamma(z)$ — гамма-функция; $\sigma = \sigma(x)$ — стандартное отклонение; $m = m(x)$ — центр распределения; τ — время, $\alpha = \alpha(x)$ — 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 уравнение (1) описывает распределения, близкие по своим свойствам распределению Коши; $\alpha = 1$ — представляет распределение Лапласа, имеющее более островершинный вид, чем у нормального распределения; $\alpha = 2$ — соответствует нормальному распределению; $\alpha > 2$ — идентифицирует распределения, близкие по своим свойствам к трапецеидальным распределениям; $\alpha \rightarrow \infty$ — отражает равномерное распределение.

На *третьем* этапе в скользящем режиме были вычислены двухмерные плотности вероятностей независимых аномалий температуры и осадков посредством двухмерной экспоненциальной модели:

$$p(x_t, x_o, \tau) = \frac{\alpha_t \alpha_o}{2\lambda_t \sigma_t \Gamma(1/\alpha_t) 2\lambda_o \sigma_o \Gamma(1/\alpha_o)} \exp\left(-\left[\left|\frac{x_t - m_t}{\lambda_t \sigma_t}\right|^{\alpha_t} + \left|\frac{x_o - m_o}{\lambda_o \sigma_o}\right|^{\alpha_o}\right]\right), \quad (3)$$

где t — аномалия температуры воздуха; o — аномалия количества атмосферных осадков.

Правомочность использования двухмерной модели (3) для независимых аномалий температуры и осадков обусловлена, прежде всего, различными законами их статистических распределений, что проявляется через различные значения параметров α_t и α_o , и, кроме того, подтверждена экспериментально: во всех численных экспериментах значения двухмерной функции распределения аномалий температуры и осадков были близки к 1.

На *четвертом* этапе размах аномалий температуры воздуха и количества атмосферных осадков были разделены на пять диапазонов: значительно ниже нормы, ниже нормы, норма, выше нормы, значительно выше нормы. В результате было получено 25 различных сочетаний диапазонов аномалий температуры и осадков, которые в дальнейшем рассматривались как 25 типов климата от *очень холодного* и *очень сухого* до *очень теплого* и *очень влажного*.

На *пятом* этапе в скользящем режиме посредством двухмерной функции распределения аномалий температуры и осадков (3), вычисленной согласно с идентифицированным двумерным законом их статистических распределений, были рассчитаны частоты каждого из 25 типов климата.

На *шестом* этапе (для объективной оценки устойчивости климата) была вычислена в скользящем режиме энтропия информации H [6] вероятностей типов климата:

$$H(x_t, x_o, \tau) = - \sum_1^{25} P(x_t, x_o, \tau) \lg[P(x_t, x_o, \tau)]. \quad (4)$$

Результаты исследования и их обсуждение. Динамика значений альфа (параметров формы статистических распределений аномалий температуры и осадков) за период с 1904 по 2010 гг. свидетельствует об их существенных различиях и значительной изменчивости. Как следствие, двухмерные плотности вероятностей аномалий температуры воздуха и количества атмосферных осадков различаются также существенно, например, за 1900–1904 гг. и 1977–1981 гг. (рис. 1), что в свою очередь проявляется в динамике частоты типов климата (рис. 2, 3).

Наиболее вероятным (0,32–0,55) со слабым положительным трендом ($y = 0,001x + 0,372$) оказался климат с *нормальной температурой* и *осадками в пределах нормы* (см. рис. 2). Менее вероятен (0,05–0,22) *сухой климат с нормальной температурой*, имеющий очень слабый положительный тренд ($y = 0,0004x + 0,1355$). В противофазе к нему меняется вероятность (0,01–0,15) *теплого климата с нормальной влажностью*, также с очень слабым положительным трендом, интенсивность которого возросла в десяток раз ($y = 0,003x + 0,0335$) с 1980 по 2010 гг.

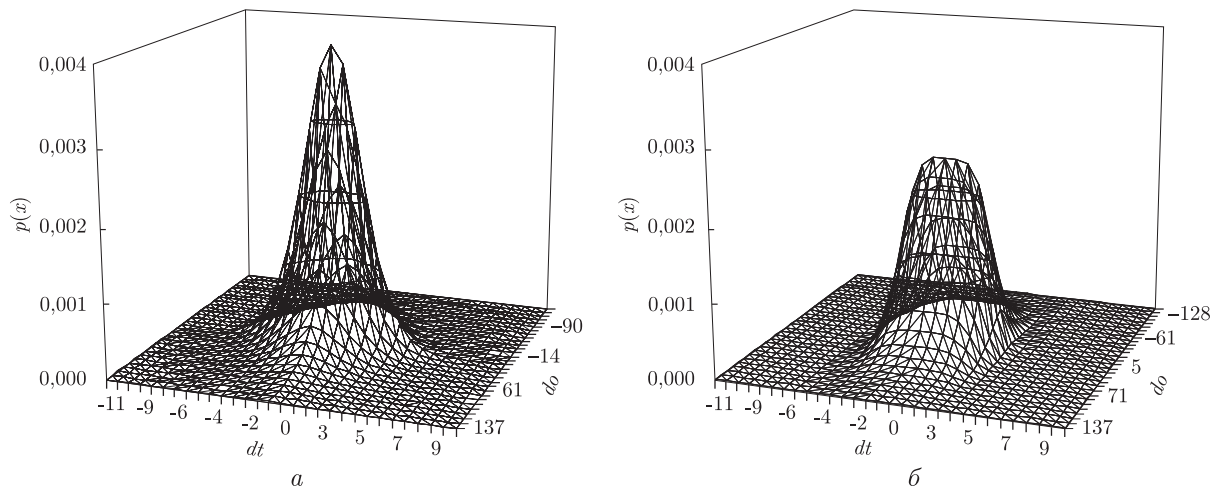


Рис. 1. Двухмерные плотности вероятности $p(x)$ аномалий температуры воздуха (dt) и атмосферных осадков (do) в районе Киева за 1900–1904 гг. (а), 1977–1981 гг. (б)

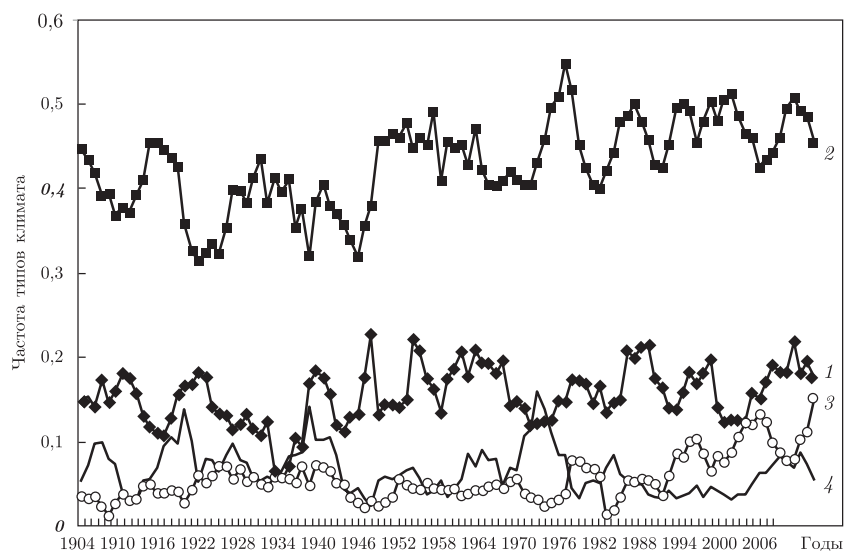


Рис. 2. Вероятности (0,01–0,55) типов климата в районе Киева: нормально теплый сухой (1), нормально теплый нормально влажный (2), теплый нормально влажный (3), нормально теплый влажный (4)

На первый взгляд, можно было бы не обращать внимания на типы климата, частоты которых меньше 0,01, но их наличие, как правило, определяет степень экстремальности климата. Динамика их также свидетельствует о доминирующих тенденциях: например, вероятность *холодного сухого климата* (0,03–0,12) убывает с отрицательным трендом ($y = -0,0004x + 0,0775$); также убывает вероятность (0,005–0,06) *холодного и влажного климата* (см. рис. 3) с очень слабым трендом. Напротив, увеличивается вероятность *теплого сухого климата*, особенно в течение последних 30 лет ($y = 0,0011x \pm 0,0113$). На протяжении 1998–2010 гг. возросла практически вдвое вероятность *теплого влажного климата*. Не выявлено существенных тенденций в динамике других типов климата.

Следовательно, наиболее вероятным является климат с *нормальной температурой и осадками в пределах нормы*. Менее вероятен *сухой климат с нормальной температурой*,

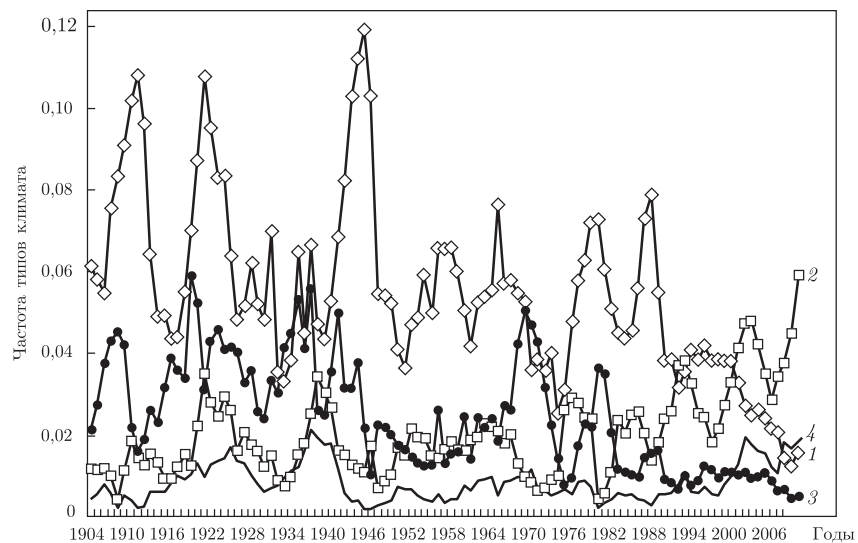


Рис. 3. Вероятности (0,002–0,119) типов климата в районе Киева: холодный сухой (1), теплый сухой (2), холодный влажный (3), теплый влажный (4)

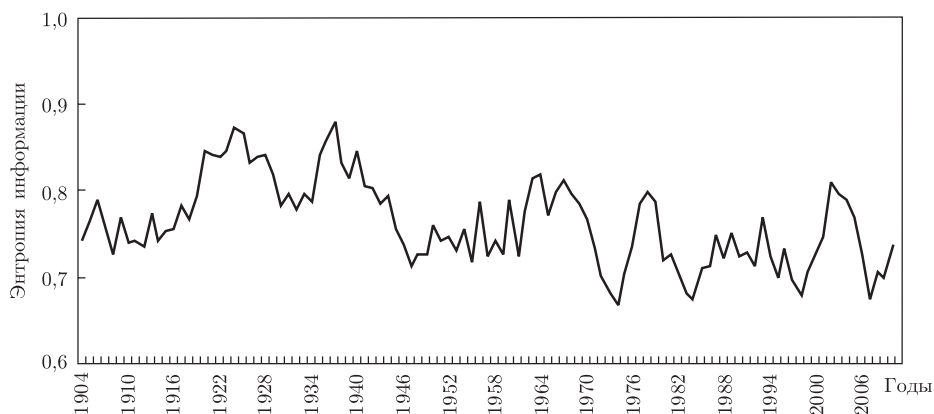


Рис. 4. Энтропия информации вероятностей типов климата в районе Киева (максимальное в данном случае значение $H = 1,39794$ возможно только при климатическом хаосе)

конкурирующий с *теплым климатом нормальной влажности*, интенсивность которого возросла на порядок за период с 1980 по 2010 гг. Убывают вероятности *холодного сухого климата* и *холодного влажного климата*. Увеличиваются вероятности *теплого сухого климата* в течение последних 30 лет, и *теплого влажного* — в течение последних 10 лет. Возрастание частоты *теплых типов климата* соответствует глобальной тенденции, а рост *нормального и сухого режимов влажности* является региональной особенностью.

Энтропия вероятностей типов климата колеблется в пределах 48–63% климатического хаоса (рис. 4) и обнаруживает отрицательную тенденцию ($y = -0,0008x + 0,885$), что может рассматриваться как слабый признак стабилизации климата в области его нормальных состояний.

Таким образом, двумерный закон статистических распределений аномалий температуры воздуха и количества атмосферных осадков является эффективным инструментом оценки состояния местного климата.

1. Монин А. С. История климата. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1979. – 376 с.
2. Международный метеорологический словарь, № 182. – Женева: Всемир. метеорол. орг-ция, 1992. – 784 с.
3. Айвазян С. А., Бухштабер В. М., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности. – Москва: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
4. Гихман И. И., Скороход А. В. Теория случайных процессов. Т. 1. – Москва: Наука, 1971. – 664 с.
5. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
6. Шеннон К. Э. Работы по теории информации и кибернетике. – Москва: Изд-во иностр. лит., 1963. – 829 с.

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

Поступило в редакцию 26.04.2012

Л. А. Ковальчук

Оцінювання стану місцевого клімату двовимірним законом статистичних розподілів аномалій температури повітря та атмосферних опадів на прикладі Києва

Запропоновано алгоритм оцінки стану клімату за допомогою двовимірної щільності ймовірностей аномалій температури повітря та кількості атмосферних опадів. Домінуючим у районі Києва є клімат з нормальною температурою та опадами в межах норми, що супроводжується зростанням частоти теплих типів і зменшенням частоти холодних сухих типів клімату. Ентропія ймовірностей типів клімату коливається в межах 48–63% кліматичного хаосу і виявляє слабку ознаку стабілізації клімату в області його нормальних станів.

L. A. Kovalchuk

Evaluation of the local climate via a two-dimensional statistical distribution of anomalies in air temperature and precipitation by the example of Kiev

An algorithm for the assessment of climate changes by means of anomalies of two-dimensional probability density of air temperature and precipitation is proposed. The most likely type of climate in the Kiev area is one with normal temperature and precipitation within the climatic norm, the rising probability of warm types, and a decrease in the probability of cold dry climates. The entropy of the probabilities of climate types lies in the range 48–63% of the climate chaos and shows the weak sign of a stabilization of the climate in its normal states.