

Член-корреспондент НАН Украины В. И. Осадчий, Л. А. Ковальчук

Стохастическое оценивание местного климата на основе вековых наблюдений за температурой воздуха и атмосферными осадками

Посредством трехпараметрического распределения Гаусса ($G_{\mu,\sigma,\varepsilon}$) воссоздана вековая динамика статистических распределений температуры воздуха и атмосферных осадков на основе наблюдений в Киеве. Осуществлены линейные прогнозы μ , σ , ε , что позволило рассчитать плотности вероятностей и вероятности категорий температуры и осадков на 2010–2016 гг., 2017–2023 гг. Вековое 5%-е потепление сопровождается также высокими вероятностями отрицательных аномалий температуры. Статистические параметры атмосферных осадков подчинены межгодовой вариабельности и вековой стабильности. Климатический процесс един и не делим: выборочным спектрам температуры и осадков характерна изменчивость не только по амплитуде, но и по фазе.

Состояние проблемы. С климатическим потеплением связывают увеличение частоты как стихийных, так и экстремальных метеорологических явлений в Украине [1]. Климатическим изменениям приписывают нарушения сезонных ритмов, хотя не установлены причины ранних или поздних сезонов, или, другими словами, фазовых смещений температуры относительно нормы. К тому же нет обоснования устойчивости положительных трендов температуры, т. е. не изучена предсказуемость климата. В результате воздействия на климатическую систему природных и антропогенных факторов предвидится к 2100 г. повышение глобальной температуры на 2–4 °С относительно ее значения в начале промышленной революции [2].

В связи с гипотезой о глобальном потеплении, нами дана объективная оценка будущего состояния регионального климата как основа для принятия стратегических решений.

Материал и методика. В основу исследования положены ежедневные значения температуры воздуха и атмосферных осадков в Киеве, полученные Гидрометеорологической службой Украины по результатам стандартных наблюдений, которые были очищены от детерминированной составляющей — годового хода. Из ежедневных значений температуры воздуха или атмосферных осадков вычитались среднемноголетние значения температуры или осадков соответствующего дня, т. е. значения медианы. По температуре воздуха использованы ежедневные аномалии с 1900 по 2010 гг.; по атмосферным осадкам, учитывая их нерегулярность, использованы месячные суммы аномалий осадков с 1881 по 2010 гг.

Будущее состояния климата оценено не традиционно, а посредством прогнозирования характеристик климата: средних значений температуры и осадков, при помощи параметров статистических распределений температуры и осадков. Идентифицированные по ожидаемым параметрам законы (статистических распределений температуры и осадков) были соответственно сопоставлены с современными законами и с законами вековой давности, что позволило оценить существенность возможных изменений климата в рамках интервала предсказуемости. Законы идентифицировались трехпараметрической (μ , σ , ε) моделью

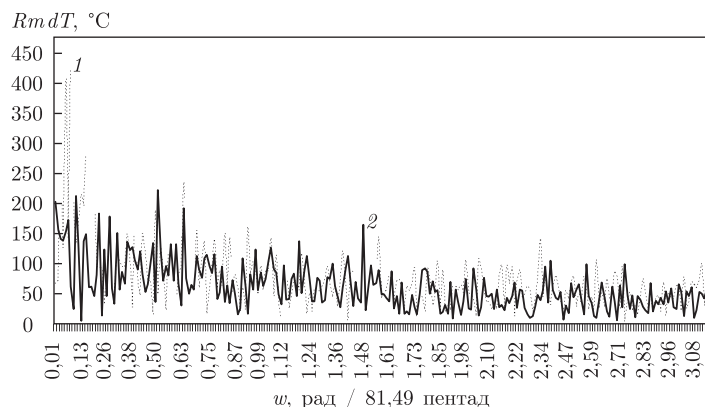


Рис. 1. Выборочная спектральная плотность ($Rm dT$ — амплитудно-частотная характеристика) аномалий температуры воздуха в Киеве: 1 — 1929–1935 гг.; 2 — 2003–2009 гг.

Гаусса [3] (generalized Gaussian distribution). Кроме того, были вычислены предшествовавшие и ожидаемые вероятности аномалий температуры воздуха и осадков по семи диапазонам, а именно: экстремально ниже нормы, значительно ниже нормы, ниже нормы, норма, выше нормы, значительно выше нормы, экстремально выше нормы.

Целостность климатического процесса исследовалась с привлечением гармонического анализа [3, 4].

На первом этапе к расчетам привлекались средне пятидневные аномалии температуры воздуха, подвергнутые скользящему гармоническому анализу по семилетиям, когда длина анализируемого временного ряда составляла 512 значений, что позволяло после каждого преобразования Фурье получать 255 гармоник. Затем вычислялись значения спектральной плотности амплитуд (амплитудно-частотные характеристики) и спектральной плотности фаз (фазово-частотные характеристики). После их анализа были выделены низко-(климатические), средне-(сезонные) и высоко-(синоптические) гармоники. Для оценки фазовых смещений были вычислены в скользящем режиме спектральные энергии фаз климатической, сезонной и синоптической составляющих колебаний температуры воздуха. Для оценки вклада каждой из групп гармоник в значения температуры были вычислены в скользящем режиме спектральные энергии амплитуд колебаний климатических, сезонной и синоптической составляющих аномалий температуры воздуха.

На втором — при скользящем гармоническом анализе месячных сумм аномалий осадков анализируемый временной ряд включал 21 год и 4 мес., что составляло 256 значений, а каждое преобразования Фурье давало 128 гармоник.

Обсуждение результатов исследований. Наиболее высокие значения спектральной плотности (нормированных амплитуд) аномалий температуры воздуха характерны для низкочастотных (0,012–0,086) гармоник климатической составляющей с периодом от 7-ми лет до 1-го года. Уменьшаются на десятки процентов амплитуды среднечастотных (0,087–1,031) гармоник сезонной составляющей с периодами от 1-го года до 3-х мес. и на сотни процентов уменьшаются амплитуды высокочастотных (1,032–3,129) гармоник синоптической составляющей с периодами от 3-х мес. до 10-ти сут (рис. 1).

Скользящие оценки спектральной энергии амплитуд, т. е. площади под кривой их спектральной плотности, которая может трактоваться, согласно Парсевалу [4], как дисперсия, показали, что дисперсии климатической, сезонной и синоптической составляющих имеют

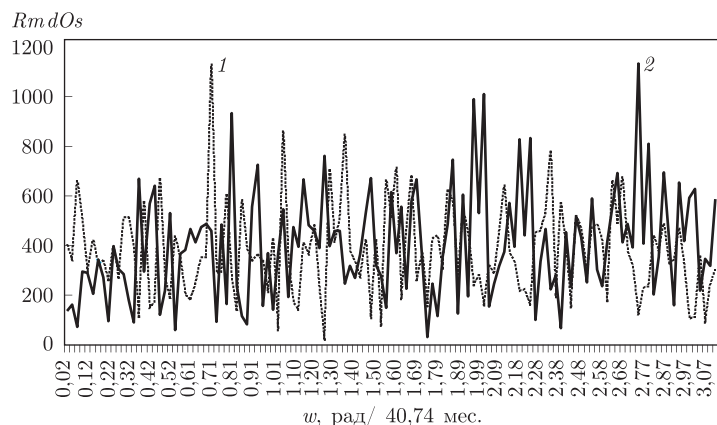


Рис. 2. Выборочная спектральная плотность ($Rm dOs$ — амплитудно-частотная характеристика) аномалий атмосферных осадков в Киеве: 1 — 1881–1902 гг.; 2 — 1986–2006 гг.

отрицательные тенденции. При этом доминировали дисперсии сезонной и синоптической составляющих над дисперсией климатической составляющей аномалий температуры. Дисперсии фаз климатической, сезонной и синоптической составляющих, симметричные относительно нуля, имеют отрицательные тенденции. Наименее слабую отрицательную тенденцию и незначительный размах колебаний имела климатическая составляющая, что свидетельствует о минимальном ее влиянии на смещения сезонностей. Размахи сезонной и синоптической составляющих были близки, частично асинхронны, тогда как синхронность, по-видимому, обуславливала сезонные смещения в хронологии аномалий температуры, т. е. смещения сроков сезонов. Проверка по средним значениям и стандартным отклонениям составляющих аномалий температуры подтвердила, что закон статистических распределений фактических аномалий температуры есть свертка законов климатической, сезонной и синоптической составляющих температуры: низко-, средне- и высокочастотные колебания температуры представляют собой единый климатический процесс.

Выборочные спектральные плотности аномалий осадков не подчинены столь однозначной изменчивости, как у аномалий температуры: напротив, с увеличением частоты, амплитуды могут расти на сотни процентов (рис. 2). Спектральная энергия климатической и сезонной составляющей аномалий осадков, как и аномалий температуры, со временем уменьшалась, но спектральная энергия синоптической составляющей аномалий осадков слабо росла. Дисперсии фаз климатической, сезонной и синоптической составляющих аномалий осадков были симметричны относительно нуля, не имели тенденций и были хаотичны, что не могло обуславливать смещения сроков сезонов. Проверка по статистическим моментам составляющих аномалий осадков также подтвердила, что закон статистических распределений аномалий осадков есть свертка законов климатической, сезонной и синоптической составляющих аномалий осадков. Климатический процесс един как по температуре, так и по осадкам.

Скользкий анализ параметров статистических распределений температурных аномалий показал, что дисперсия и эксцесс в течение века слабо уменьшались, тогда как математическое ожидание в течение последних десятилетий росло. Положительное смещение центра распределений, т. е. положительный тренд температуры в Киеве, по-видимому, обусловлен атмосферно-океаническими процессами в северных частях Атлантического, Индийского и Тихого океанов. Проверка гипотезы проведена на основе полувековых ежедневных наблю-

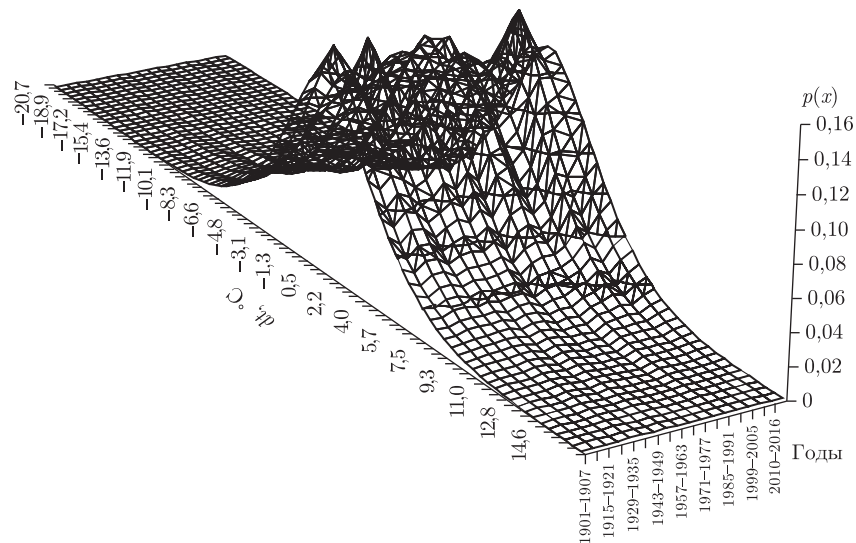


Рис. 3. Эволюция законов статистических распределений $p(x)$ аномалий температуры воздуха dT за 1901–2023 гг.

дений за температурой воздуха в Киеве, Мурманске, Петропавловске-Камчатском и Бомбее. Статистически значимой оказалась не только корреляционная матрица, но и синхронная регрессия между аномалиями температуры воздуха в Киеве и аномалиями температуры воздуха в Мурманске и Бомбее. Следовательно, в качестве интервала предсказуемости средней температурной аномалии в Киеве может быть принят минимальный период инерции атмосферно-океанических процессов, предположительно равный около 20 лет. На основании линейного прогноза математического ожидания и стандартного отклонения аномалий температуры до 2023 г. были вычислены плотности вероятностей температурных аномалий на периоды: 2010–2017 гг. и 2018–2023 гг.

Хотя эволюция плотности вероятности не может трактоваться, как значимое изменение климата (рис. 3), но она обуславливает существенные изменения вероятностей аномалий температуры по диапазонам. Повысились вероятности температурных аномалий: **экстремально выше нормы** ($+8,7 \dots + 12,0$ °C) с 0,008 до 0,016; **значительно выше нормы** ($+5,2 \dots + 8,6$ °C) с 0,05 до 0,10; **выше нормы** ($+1,8 \dots + 5,1$ °C) с 0,15 до 0,30. Несмотря на положительную тенденцию математического ожидания, понизилась за счет отрицательных тенденций дисперсии и эксцесса, вероятность температур **в пределах нормы** ($-3,0 \dots + 1,7$ °C) с 0,54 до 0,46. Понизились вероятности температур **ниже нормы** ($-9,3 \dots - 3,1$ °C) с 0,22 до 0,11; **значительно ниже нормы** ($-15,6 \dots - 9,4$ °C) с 0,015 до 0,005; **экстремально ниже нормы** ($-22,0 \dots - 15,7$ °C) с 0,007 до 0,0007. В целом с учетом размаха аномалий температур от -22 до $+12$ и повышения скользящей средней семилетней температуры на $1,6$ °C за период 1900–2010 гг. вековое потепление составило всего лишь 5%.

Скользкий анализ параметров статистических распределений осадков показал, что в течение века их математическое ожидание слабо росло с коэффициентом тренда $k_r = 0,0018$, тогда как дисперсия слабо убывала ($k_r = -0,0016$), и практически не имела тренда вариабельность эксцесса ($k_r = -0,0002$). Соответственно повысилась вероятность месячных аномалий осадков **в пределах нормы** ($-18 \dots + 25$ мм) с 0,574 до 0,581; немного повыси-

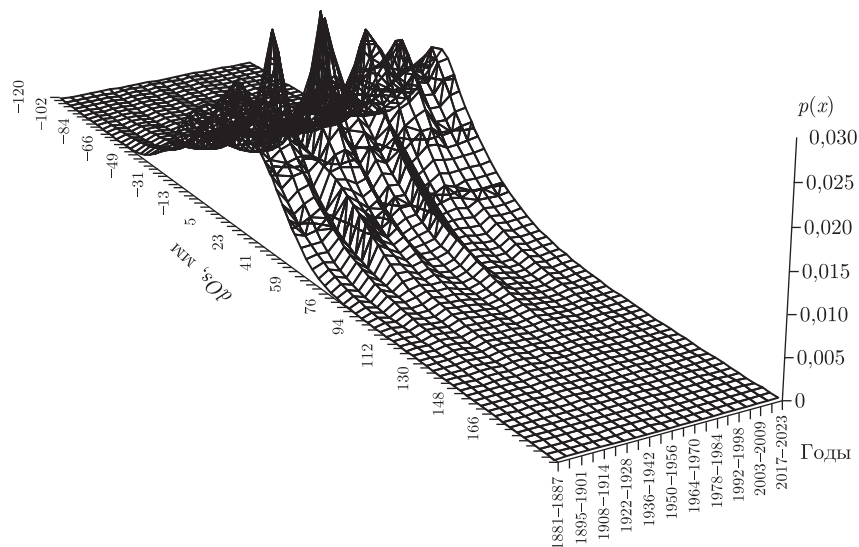


Рис. 4. Эволюция законов статистических распределений $p(x)$ аномалий атмосферных осадков dOs за 1881–2023 гг.

лись вероятности аномалий **выше нормы** (+25,1...+75 мм) с 0,183 до 0,187; **значительно выше нормы** (+75,1...+125 мм) с 0,015 до 0,0019. Не изменились вероятности (0,002) месячных аномалий осадков **экстремально выше нормы** (>125,1 мм). Понизилась вероятность аномалий осадков **ниже нормы** (–18,1...–53 мм) с 0,211 до 0,162, и не существенно повысились вероятности аномалий **значительно ниже нормы** (–53,1...–88,0 мм) с 0,032 до 0,036, а также **экстремально ниже нормы** (<–88,1 мм) с 0,004 до 0,007. Судя по вековой эволюции плотности вероятностей аномалий осадков (рис. 4), нет объективных оснований ожидать значимых изменений осадков в ближайшие два десятилетия.

Таким образом, анализ вековой динамики статистических распределений температуры воздуха и атмосферных осадков в Киеве свидетельствует о том, что потепление сопровождается значительными отрицательными аномалиями температуры воздуха, в то время как атмосферным осадкам свойственны межгодовые различия и вековая стабильность. Кроме того, спектры температуры и осадков изменчивы не только по амплитуде, но и по фазе, что подтверждает единство климатического процесса.

1. *Стихийні метеорологічні явища на території України за останнє двадцятиріччя (1986–2005 рр.)* / За ред. В. М. Ліпінського, В. І. Осадчого, В. М. Бабіченко. – Київ: Ніка-Центр, 2006. – 312 с.
2. *IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. – (AR4).* – Geneva: World Meteorological Organization (WMO), 2008. – 1327 p.
3. *Булашев С. В.* Статистика для трейдеров. – Москва: Компания Спутник+, 2003. – 245 с.
4. *Тропченко А. Ю., Тропченко А. А.* Цифровая обработка сигналов. Методы предварительной обработки. – Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2009. – 100 с.

Український науково-дослідницький
гідрометеорологічний інститут
НАН України і МЧС України, Київ

Поступило в редакцію 16.05.2013

Член-кореспондент НАН України **В. І. Осадчий, Л. А. Ковальчук**

Стохастичне оцінювання місцевого клімату на основі вікових спостережень за температурою повітря та атмосферними опадами

За допомогою трипараметричного розподілу Гауса ($G_{\mu,\sigma,\varepsilon}$) відтворено вікову динаміку статистичних розподілів температури повітря та атмосферних опадів на основі спостережень у Києві. Здійснено лінійні прогнози μ , σ , ε , що дозволило розрахувати щільність імовірності та ймовірності категорій температури й опадів на 2010–2016 рр., 2017–2023 рр. Вікове 5%-е потепління супроводжується також високими ймовірностями від'ємних аномалій температури. Статистичні параметри атмосферних опадів підпорядковані річним варіаціям та віковій стабільності. Кліматичний процес єдиний та неподільний: вибірковим спектром температури і опадів характерна мінливість не тільки за амплітудою, а й за фазою.

Corresponding Member of the NAS of Ukraine **V. I. Osadchiy, L. A. Kovalchuk**

Stochastic evaluation of a local climate on the basis of the secular watching of air temperature and rainfalls

By means of three-parameter Gauss distribution ($G_{\mu,\sigma,\varepsilon}$), the secular dynamics of the statistical distributions of air temperature and rainfalls is recreated based on supervisions in Kyiv. Linear prognoses of μ , σ , and ε are carried out, which allowed us to calculate the probability density and the probabilities of temperature categories and fallouts for 2010–2016 and 2017–2023. The secular 5% rise in temperature is accompanied by the high probabilities of temperature negative anomalies. The statistical parameters of atmospheric fallouts are inferior to interannual variations and the secular stability. The climatic process is single and not divisible: the changeability is characteristic of the selective spectra of temperature and fallouts not only in the amplitude, but also in the phase.