

Л. А. Ковальчук

Оценивание климатической и сезонной составляющих экстремальных температур воздуха на примере вековых наблюдений в Киеве

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

Осуществлен гармонический анализ сезонных аномалий температуры воздуха с 1901 по 2009 гг. Выделена низкочастотная климатическая и высокочастотная сезонная составляющие аномалий температуры воздуха, оценена их спектральная энергия. Идентифицированы законы статистических распределений циклических трендов климатической и сезонной составляющих. Установлено, что в первой половине прошлого столетия энергия сезонной составляющей превосходила энергию климатической составляющей на 164%, а к концу — только на 70%. Снижение обусловлено ослаблением энергии сезонной составляющей и увеличением энергии климатической составляющей, которые уравниваются через (35 ± 5) лет. Вследствие выявленных процессов, вклад сезонной составляющей в экстремально низкие аномалии температуры воздуха в десятки раз превышал вклад климатической составляющей. Сезонная составляющая преобладала на 80–90% в экстремально высоких аномалиях температуры воздуха и аномалиях температуры воздуха, которые были значительно ниже нормы.

Наблюдаемые экстремальные гидрометеорологические явления зачастую связывают с декларируемым глобальным потеплением. Целью работы автора было достоверное оценивание сезонной и климатической составляющих в экстремальных значениях воздуха.

В основу исследования положены ежедневные значения температуры воздуха в Киеве, полученные Гидрометеорологической службой Украины по результатам стандартных ежедневных наблюдений в синоптические сроки за период с 1901 по 2009 гг. Средне сезонные значения температуры воздуха были очищены от детерминированной составляющей — годового хода. Из ежедневных значений температуры воздуха вычитались среднесезонные значения температуры соответствующего сезона, т. е. значения медианы.

Методологической основой исследования послужили быстрые преобразования Фурье [1], которые возможны, если количество наблюдений L является четной степенью 2. При анализе сезонных аномалий температуры воздуха за 109-летний период, когда общая длина ряда составляет 436 значений, выделение климатической и сезонной составляющей предопределено 256 значениями, что соответствует 64-м годам. В нашем случае среднесезонные аномалии температуры воздуха ΔT_j были представлены таким образом:

$$\Delta T_j = \sum_{k=1}^{127} \left(\frac{a_j^k}{128} \right) \cos[(\omega_j^k)j\Delta\tau] + \left(\frac{b_j^k}{128} \right) \sin[(\omega_j^k)j\Delta\tau], \quad (1)$$

где a_j^k и b_j^k ($k = 1, 2, 3, \dots, 127$) — коэффициенты разложения аномалий среднесезонных значений температуры воздуха в ряд Фурье, $j = 0, 1, 2, \dots, 255$, $\omega_j^k = 2\pi/(Nk\Delta\tau)$ — частота,

$N = 256$ — количество членов преобразуемого временного ряда, $\Delta\tau = 1$ — шаг, равный одному сезону.

С помощью БПФ осуществлен с пятилетним сдвигом скользящий гармонический анализ сезонных аномалий температуры воздуха при окне в 64 г., соответствующего 256 значениям соответствующего отрезка временного ряда, что позволяло получать после каждого преобразования 127 гармоник, реконструирующих исходный отрезок временного ряда с погрешностью от 0,3 до 1,2%.

Затем, в скользящем режиме, для низкочастотных гармоник ($k = 1, 2, \dots, 31$) с периодами от полутора до 64-х лет, ответственных за формирование климата, была оценена спектральная энергия климатической составляющей ($\Psi_{\text{кл}}$) сезонных аномалий температуры воздуха, для чего привлекалась теорема Парсевала [1]:

$$\Psi_{\text{кл}} = \sum_1^{31} (a_j^k)^2 + \sum_1^{31} (b_j^k)^2. \quad (2)$$

Аналогично, для высокочастотных гармоник ($k = 32, 37, \dots, 127$) с периодами от трех месяцев до полутора лет, влияющих на формирование сезонов, была оценена спектральная энергия сезонной составляющей ($\Psi_{\text{сез}}$) сезонных аномалий температуры воздуха. Гармоники с частотой менее трех месяцев нивелированы при расчетах аномалий среднесезонной температуры воздуха.

Кроме того, в скользящем режиме были вычислены суммы низкочастотных гармоник: низкочастотные тренды климатической составляющей, а также суммы высокочастотных гармоник: высокочастотные тренды сезонной составляющей. Для каждого из полученных трендов вычислялись математическое ожидание (m), стандартное отклонение (σ) и эксцесс (ε), после чего идентифицировались законы статистических распределений трендов климатической составляющей и законы статистических распределений трендов сезонной составляющей. Сами законы идентифицировались в скользящем режиме по параметрам статистических распределений трендов климатической составляющей $[m(\tau)_{\text{к.с}}, \sigma(\tau)_{\text{к.с}}, \varepsilon(\tau)_{\text{к.с}}]$, а также по параметрам статистических распределений трендов сезонной составляющей $[m(\tau)_{\text{с.с}}, \sigma(\tau)_{\text{с.с}}, \varepsilon(\tau)_{\text{с.с}}]$ посредством симметричной экспоненциальной модели [1]:

$$p(x, \tau) = \frac{\alpha}{2\lambda\sigma\Gamma(1/\alpha)} \exp\left(-\left|\frac{x-m}{\lambda\sigma}\right|^\alpha\right), \quad (3)$$

где $\lambda = \sqrt{\frac{\Gamma(1/\alpha)}{\Gamma(3/\alpha)}}$, — гамма-функция, $m = m(\tau)$ — центр распределения, $\sigma = \sigma(\tau)$ — стандартное отклонение, $\alpha = \alpha(\tau)$ — некоторая характеристика распределения, однозначно определяющая параметр формы экспоненциальных распределений — эксцесс (ε):

$$\varepsilon = \frac{\Gamma(1/\alpha)\Gamma(5/\alpha)}{(\Gamma(3/\alpha))^2}. \quad (4)$$

Если $\alpha < 1$, то модель (3) 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 трапецеидальным распределениям; $\alpha \rightarrow \infty$ — модель отражает равномерное распределение.

После идентификации законов статистических распределений (с помощью соответствующих функций распределения) низкочастотных трендов климатической составляющей и высокочастотных трендов сезонной составляющей (в скользящем режиме) рассчитывались вероятности сезонных аномалий температуры воздуха по 7-ми диапазонам, но с учетом известной асимметрии. Именно: экстремально ниже нормы (ЭкстрНН $< -3,8$), значительно ниже нормы ($-3,8 < ЗНН < -2,61$), ниже нормы ($-2,6 < НН < -1,41$), норма ($-1,4 < Н < -0,2$), выше нормы ($-0,19 < ВН < 1$), значительно выше нормы ($1,1 < ЗВН < 2,2$), экстремально выше нормы (ЭкстрВН $> 2,3$). В завершение был проведен сравнительный анализ по 7-ми диапазонам вероятностей сезонных аномалий температуры воздуха климатической и сезонной составляющих, а также определено относительное превышение вероятностей одной составляющей над другой.

Верификация результатов исследования выполнена экспериментально. Если климат стабилен, то климатическая составляющая должна быть несмещенной — постоянной на всем периоде исследований 1901–2009 гг. и не зависеть от интервала ее оценивания. В значительной мере свойство независимости от интервала оценивания подтвердила корреляционная матрица трендов климатической составляющей, где коэффициент корреляции при максимально возможном сдвиге в 46 лет составляет 0,9302. Если бы коэффициенты корреляции были равны 1, то климат был бы стабильным. Аналогичным свойством обладают тренды сезонной составляющей, где коэффициент корреляции при максимально возможном сдвиге составляет 0,9873; в случае же равенства его 1, сезоны не имели бы существенных различий. Напомним, что сумма климатического и сезонного трендов реконструирует соответствующий отрезок временного ряда с погрешностью от 0,3 до 1,2%, в то время как сами отрезки временного ряда сезонных аномалий температуры воздуха не имеют взаимных статистически значимых коэффициентов корреляции. При сдвиге на один шаг коэффициент корреляции опускается до 0,23, при сдвиге на два шага составляет $-0,008$, три шага — $0,02$, четыре шага — $0,19$. Следовательно, столь не существенные различия, в трендах климатической составляющей и в трендах сезонной составляющей, обуславливают практически непредсказуемые, а порой и грандиозные гидрометеорологические явления.

Предварительное представление о вкладе климатической и сезонной составляющих в экстремальные значения температуры дает спектр коэффициентов a_j^k и b_j^k , т. е. их распределение по частотам. Главная особенность скользящих спектров состоит в том, что величина размаха колебаний значений a_j^k и b_j^k , вообще говоря, не была привязана к конкретным частотам и уменьшилась на 10–15% за период исследований. Учитывая, что климатическая составляющая формируется 31-й гармоникой, а сезонная — зависима от 96-ти гармоник, естественно предположить, что вклад сезонной составляющей в экстремальные значения температуры будет превосходить вклад климатической составляющей. Предположение количественно подтверждено сопоставлением спектральной энергии сезонной и климатической составляющих. Спектральная энергия сезонной составляющей существенно превосходила спектральную энергию климатической. В течение 1901–1964 гг. превышение составляло 164%, а в 1946–2009 гг. — 70%. Снижение обусловлено тем, что спектральная энергия сезонной составляющей за исследуемый период ослабевала ($\Psi_{\text{кл}} = -2185\tau + 76209$, $R^2 = 0,955$), а спектральная энергия климатической составляющей, наоборот, имела тенденцию к повышению ($\Psi_{\text{сез}} = 671,5\tau + 24809$, $R^2 = 0,712$). При сохранении выявленных тенденций сезонная и климатическая составляющие уравниваются через (35 ± 5) лет.

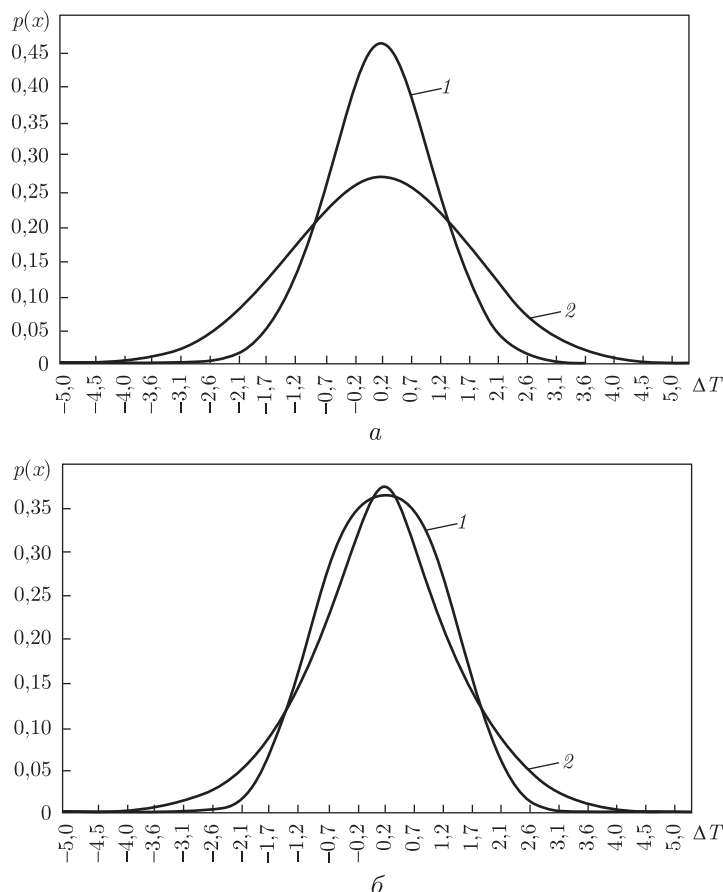


Рис. 1. Законы статистических распределений $p(x)$ климатической составляющей (1) и сезонной (2): a — за 1901–1964 гг.; b — за 1946–2009 гг.

Скользящие законы статистических распределений трендов климатической составляющей и трендов сезонной составляющей за период исследований существенно трансформировались. На отрезке 1901–1964 гг. кривая плотности вероятности климатической составляющей более островершинная, чем кривая плотности вероятности сезонной составляющей, а их формы подобны распределению Гаусса (рис. 1, a). Но к 1946–2009 гг. формы законов статистических распределений климатической и сезонной составляющих существенно отличались от гауссовых форм. Плотность вероятности климатической составляющей приобрела трапецидальную форму, а плотность вероятности сезонной составляющей стала островершинной (см. на b рис. 1).

Трансформации законов статистических распределений отразились на вероятностях аномалий температуры воздуха климатической и сезонной составляющих. Вероятность экстремально высоких (ЭкстрВН) и экстремально низких (ЭкстрНН) аномалий температуры воздуха климатической составляющей также, как и вероятность аномалий воздуха, значительно ниже нормы (ЗНН) была близка к нулю. Вероятность нормы (Н) климатической составляющей находилась в пределах 0,36–0,37, вероятность аномалий выше нормы (ВН) имела слабую тенденцию к снижению от 0,47 до 0,44, а вероятность аномалий значительно выше нормы (ЗВН) росла от 0,1 до 0,12 и также повышалась вероятность от 0,06 до 0,08 аномалий ниже нормы (НН). Иные тенденции и распределения вероятности характерны

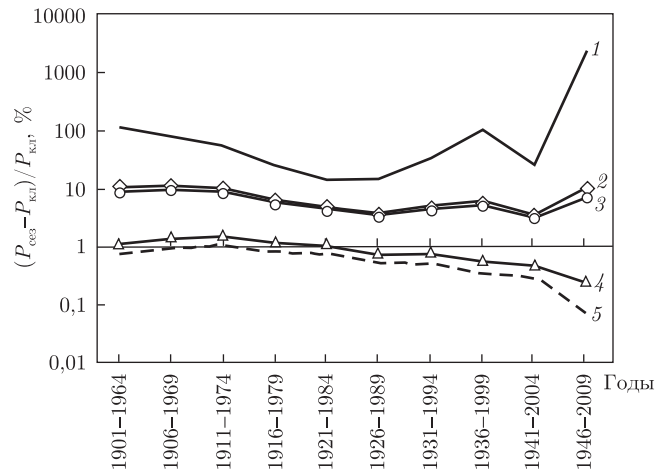


Рис. 2. Относительное превышение вероятностей аномалий температуры воздуха сезонной составляющей над климатической $[(P_{\text{сез}} - P_{\text{кл}})/P_{\text{кл}}]$ по диапазонам: экстремально ниже нормы (1), значительно ниже нормы (2), экстремально выше нормы (3), ниже нормы (4), значительно выше нормы (5)

для аномалий температуры воздуха сезонной составляющей. Вероятность экстремально низких аномалий (ЭкстрНН) находилась в диапазоне 0,004–0,005, а вероятность экстремально высоких аномалий (ЭкстрВН) колебалась около 0,05, имея слабую тенденцию к понижению. Подобную тенденцию и вероятность, близкую 0,04, имели аномалии температуры значительно ниже нормы (ЗНН). Вероятность 0,15 связана с аномалиями температуры значительно выше нормы (ЗВН) и аномалиями температуры ниже нормы (НН). Повышение вероятности от 0,30 до 0,35 сопровождало аномалии температуры выше нормы (ВН). Рост вероятности от 0,28 до 0,30 показателен норме аномалий (Н) сезонной составляющей.

Полученные вероятности аномалий температуры воздуха по 7-ми диапазонам как для климатической, так и сезонной составляющих позволили вычислить относительное превышение вероятностей аномалий сезонной составляющей над климатической $[(P_{\text{сез}} - P_{\text{кл}})/P_{\text{кл}}]$ по диапазонам (рис. 2). Вклад сезонной составляющей в экстремально низкие (ЭкстрНН) аномалии температуры воздуха в десятки, а то и сотни раз превышал вклад климатической составляющей. Сезонная составляющая также преобладала на 80–90% в экстремально высоких аномалиях температуры (ЭкстрВН) и аномалиях, которые были значительно ниже нормы (ЗНН). Превышение вклада сезонной составляющей над климатической характерно для аномалий температуры ниже нормы (НН) и значительно выше нормы (ЗВН), однако доминирование уменьшилось от 40–50% вначале до 10–20% к концу исследуемого периода. Напротив, преобладал относительный вклад климатической составляющей над сезонной $[(P_{\text{кл}} - P_{\text{сез}})/P_{\text{кл}}]$ для аномалий температуры воздуха в пределах нормы (Н) и выше нормы (ВН), хотя (со временем) он существенно понизился с 25–35% до 10–15% (рис. 3).

Таким образом, в 1901–1964 гг. спектральная энергия сезонной составляющей превосходила спектральную энергию климатической составляющей на 164%, а в 1946–2009 гг. — на 70%. Снижение обусловлено ослаблением энергии сезонной составляющей и увеличением энергии климатической составляющей, которые уравниваются через (35 ± 5) лет. Как следствие, вклад сезонной составляющей в экстремально низкие аномалии температуры

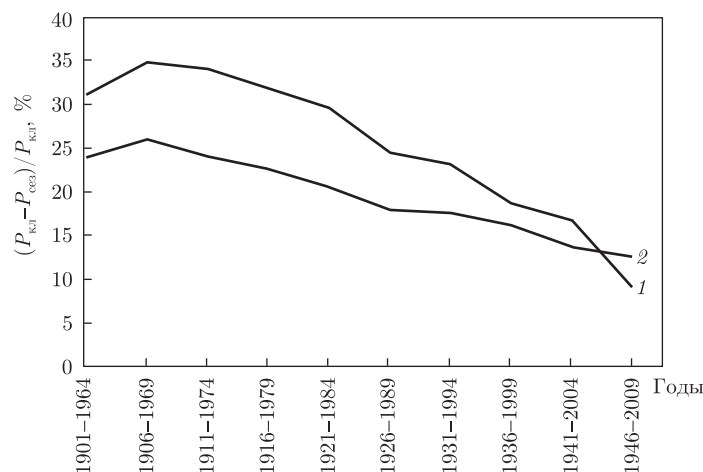


Рис. 3. Относительное превышение вероятностей аномалий температуры воздуха климатической составляющей над сезонной $[(P_{\text{кл}} - P_{\text{сез}})/P_{\text{кл}}]$ по диапазонам: выше нормы (1), норма (2)

воздуха в десятки раз превышал вклад климатической составляющей. Сезонная составляющая преобладала на 80–90% в экстремально высоких аномалиях температуры и аномалиях температуры, которые были значительно ниже нормы.

1. Тропченко А Ю., Тропченко А. А. Цифровая обработка сигналов. Методы предварительной обработки. – Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2009. – 100 с.
2. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Ленинград: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1985. – 248 с.

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

Поступило в редакцію 01.02.2013

Л. А. Ковальчук

Оцінювання кліматичної і сезонної складових екстремальних температур повітря на прикладі вікових спостережень у Києві

Здійснено гармонічний аналіз сезонних аномалій температури повітря з 1901 по 2009 рр. Виділено низькочастотну кліматичну і високочастотну сезонну складові аномалій температури повітря, оцінено їх спектральну енергію. Ідентифіковано закони статистичних розподілів циклічних трендів кліматичної і сезонної складових. Встановлено, що в першій половині минулого століття енергія сезонної складової перевищувала енергію кліматичної складової на 164%, а під кінець — тільки на 70%. Зниження обумовлено ослабленням енергії сезонної складової і збільшенням енергії кліматичної складової, які зрівнюються через (35 ± 5) років. Внаслідок виявлених процесів, вклад сезонної складової в екстремальні низькі аномалії температури повітря в десятки раз перевищував вклад кліматичної складової. Сезонна складова переважала на 80–90% в екстремальних високих аномаліях температури повітря та в аномаліях температури повітря, які були значно нижче норми.

L. A. Kovalchuk

Evaluation of the climatic and seasonal components of extreme air temperatures by the example of centennial observations in Kyiv

The harmonic analysis of seasonal anomalies of the air temperature is carried out from 1901 till 2009. A low-frequency climatic constituent and a high-frequency seasonal constituent of anomalies of the air temperature are distinguished. Their spectral energy is appraised. The laws of statistical distributions of the cyclic trends of climatic and seasonal constituents are identified. It is found that, in the first half of the last century, the seasonal constituent energy exceeded the energy of the climatic constituent by 164% and only by 70% to the end of the century. A decline is caused by a weakening of the seasonal constituent energy and an increase of the climatic constituent energy, which will be equal in (35 ± 5) yr. Because of the revealed processes, the contribution of the seasonal constituent to extremely small anomalies of the air temperature was by several tens of times more than that of the climatic constituent. The seasonal constituent prevailed by 80–90 % in extremely high anomalies of the air temperature and in temperatures anomalies that were considerably below than the norm.