



УДК 551.583

© 2007

С. Г. Бойченко, В. М. Волощук

**Стохастическая полуэмпирическая модель
пространственно-временной трансформации
современного климата Украины**

(Представлено академиком НАН Украины В. И. Старостенко)

The structure of analytical stochastic semi-empirical models of the spatio-temporal transformation of a modern regional climate for the plain part of the territory of Ukraine is worked out and proved. By the statistical analysis of the data of instrumental observations on meteorological stations of Ukraine for the period exceeding 100 years, the essential efficiency of these models for the description of climatic fields of the temperature of air and atmospheric precipitations is confirmed.

Практически общеприняты в современной научной климатической литературе следующие определения: “климат” — статистический ансамбль состояний, которые проходит земная климатическая система (атмосфера — океан — литосфера) за период времени, порядка несколько десятилетий; “погода” — отдельная реализация этого статистического ансамбля для одного из звеньев земной климатической системы — атмосферы (см., к примеру, [1, 2]). Общеизвестно, что характеризующие климат параметры зависят от географических координат местности, в том числе от ее высоты над уровнем моря, а также обладают сезонным ходом. Эти зависимости обычно представляют в виде соответствующих таблиц или изолиний на географических картах, построенных для различных сезонов. Такое представление климатических полей обладает определенными преимуществами, однако оно имеет также и существенные недостатки. Один из главных недостатков табличного или картографического представления климатических полей — серьезные трудности его использования для расчетов различных пространственно-временных экстремумов (точнее, критических уровней) и пространственно-временных функционалов, необходимых при решении различных задач прикладной климатологии (эоклиматологии, агрометеорологии, теплоэнергетики и т. п.). Естественно, что для оценки такого типа экстремумов (критических уровней) или функционалов было бы крайне желательно иметь аналитические модели географического распределения и временной трансформации региональных климатических полей.

Конструированию аналитических полуэмпирических региональных климатических моделей для Украины посвящено наше исследование, результаты которого являются основным предметом данной публикации. Отдельные фрагменты этих моделей опубликованы нами в статьях [3–7]. Отметим, что аналогичные модели разрабатывались и для других физико-географических регионов [8–10].

Аналитическое представление климатических полей обладает еще одним важным преимуществом: оно естественным образом учитывает пространственно-временную связность климатических параметров и тем самым позволяет автоматически отфильтровывать случайные “выбросы” в массиве данных. Такие операции при картографическом представлении связано с некоторыми неопределенностями, причем трудно контролируемые, а при табличном представлении отфильтровывание вообще не следует проводить, чтобы не испортить по субъективным обстоятельствам эмпирические данные.

Разработанные нами модели имеют полуэмпирический характер. Напомним, что “полуэмпирические формулы — это формулы, структура которых устанавливается на основе теоретических соображений, а эмпирические константы (численные значения коэффициентов) — на основе статистического анализа эмпирических данных” [11].

Общая структура полуэмпирической региональной модели климатических полей Украины. Обозначим совокупность климатических величин, которые характеризуют современный климат Украины, через Ω . Пространственно-временную трансформацию Ω представим в виде

$$\Omega(\varphi, \lambda, h; t_s, t) = \text{ngm}\{\Omega\} + \text{trn}\{\Omega\}(t - t_0) + \text{var}\{\Omega\}\varepsilon\{\Omega\}, \quad (1)$$

где φ и λ — географические координаты местности (широта и долгота); h — высота местности над уровнем моря; t_s — сезонное время, отсчитываемое в долях года; t — время, отсчитываемое в годах (номер года); t_0 — некоторый фиксированный номер года; $\text{ngm}\{\Omega\}$ — климатическая норма; $\text{trn}\{\Omega\}$ — коэффициент линейного тренда; $\text{var}\{\Omega\}$ — статистическая оценка случайной междугодовой изменчивости среднемесячных значений Ω ; $\varepsilon\{\Omega\}$ — безразмерная случайная функция.

В современный период времени климатическую норму $\text{ngm}\{\Omega\}$ целесообразно определять как среднее арифметическое для периода времени 1971–2000 гг., который практически полностью охватывает последнюю восходящую ветвь известного квазипериодического колебания глобального климата (см. [12]), а это позволяет вполне обосновано значение t_0 выбрать равным его середине, т. е. положить t_0 , равным 1985 г., где практически глобальный линейный тренд пересекает восходящую ветвь последней волны квазипериодического колебания. Коэффициент линейного тренда $\text{trn}\{\Omega\}$ определяется по эмпирическим данным методом наименьших квадратов для периода 1895–1985 гг., который выбирается таким образом, чтобы избежать возможного искажения значений $\text{trn}\{\Omega\}$ квазипериодическим колебанием климата. Статистическая оценка $\text{var}\{\Omega\}$ случайной междугодовой изменчивости среднемесячных значений Ω играет в модельном соотношении (1) роль размерного нормировочного множителя. Анализ эмпирических данных показал, что статистически значимых тенденций в поведении междугодовой изменчивости среднемесячных значений параметров климата на территории Украины за последние 100–150 лет не существовало.

Функция $\varepsilon\{\Omega\}$ описывает междугодовой “микrokлиматический” шум, нормированный на междугодовую изменчивость среднемесячных значений метеовеличин. Введение в соотношение (1) случайной функции ε переводит конструируемую полуэмпирическую модель региональных климатических полей из разряда детерминированных в разряд сто-

хастических. Путем анализа эмпирических данных нами установлено, что безразмерная случайная функция ε является практически стационарной и однородной для территории Украины (зависимость межгодовой изменчивости от географических координат, высоты местности над уровнем моря и сезонного времени практически полностью снимается множителем $\text{var}\{\Omega\}$). Математическое ожидание ε равно нулю (по определению). Дисперсия случайной функции ε при усреднении соотношения (1) по промежуткам времени, порядка одного месяца, равна единице (в соответствии с определением $\text{var}\{\Omega\}$). При увеличении (уменьшении) продолжительности промежутков времени $\Delta\tau$, по которым усредняется соотношение (1), дисперсия ε уменьшается (увеличивается) обратно пропорционально корню квадратному от $\Delta\tau$ (в соответствии с известным правилом изменения дисперсии сумм независимых случайных величин). В соответствии с данными современной метеорологической науки и практикой составления долгосрочных прогнозов погоды отдельными группами исследователей функцию $\varepsilon(t_s)$ для каждого Ω можно считать практически дельта-коррелированной при усреднении (1) по промежуткам времени $\tau_{fr} \sim 15\text{--}30$ сут (для умеренных широт Северного полушария). Оперативный долгосрочный прогноз погоды на промежуток времени, превышающий τ_{fr} , практически невозможен, за исключением ситуаций, связанных с очень редкими геофизическими событиями (взаимное блокирование антициклонов в умеренных широтах, сверхдальнее атмосферное возмущение явлением Эль-Ниньо и т. п., см., к примеру, [13]).

Эмпирическое распределение междугодичного климатического шума приземной температуры и атмосферных осадков (при среднемесячном осреднении) приведено в табл. 1, где τ — нормированная на среднеквадратическое отклонение вариация климатической величины. В таблице приведены также соответствующие значения для нормального распределения, обладающего, как известно [14], минимальной информационной негэнтропией в свободной системе (при отсутствии различного типа доминирующих факторов, например, естественного “запрета” на отрицательные значения сумм атмосферных осадков и т. п.).

В соответствии с представлениями современной климатологии, сезонный ход составляющих модели (1) представляем в виде суперпозиции: “среднегодовое значение + годовая гармоника + полугодовая гармоника”:

$$\Psi(t, \lambda, h; t_s) \rightarrow (\text{nrm}\{\Omega\}, \text{trn}\{\Omega\}, \text{var}\{\Omega\}), \quad \Psi = \Psi_0 + \Psi_s, \quad \Psi_s = \Psi_1 + \Psi_{1/2},$$

$$\Psi_1 = a_c \cos\left(2\pi \frac{t_s}{\tau_0}\right) + a_s \sin\left(2\pi \frac{t_s}{\tau_0}\right), \quad \Psi_{1/2} = b_c \cos\left(4\pi \frac{t_s}{\tau_0}\right) + b_s \sin\left(4\pi \frac{t_s}{\tau_0}\right), \quad (2)$$

Таблица 1. Эмпирические оценки современного статистического распределения среднемесячных температур и месячных сумм атмосферных осадков для территории Украины

Интервал τ	Нормальное (гауссово) распределение	Эмпирическое распределение	
		приземных температур	атмосферных осадков
$\tau \leq -1,5$	0,067	0,066	0,025
$-1,5 < \tau \leq -1,0$	0,092	0,097	0,118
$-1,0 < \tau \leq -0,5$	0,150	0,154	0,215
$-0,5 < \tau \leq 0$	0,191	0,182	0,211
$0 < \tau \leq 0,5$	0,191	0,183	0,158
$0,5 < \tau \leq 1,0$	0,150	0,146	0,113
$1,0 < \tau \leq 1,5$	0,092	0,105	0,073
$1,5 < \tau$	0,067	0,067	0,087

где Ψ_0 и Ψ_s — среднегодовое значение и сезонная составляющая Ω , зависящие от географических координат и высоты местности над уровнем моря; Ψ_1 — годовая гармоника сезонной составляющей (с периодом — один год); $\Psi_{1/2}$ — полугодовая гармоника сезонной составляющей (с периодом — полгода); τ_0 — продолжительность года; t_s — сезонное время, отсчитываемое от начала года в тех же единицах, что и τ_0 ; $\{a_c, a_s, b_c, b_s\}$ — функции географических координат и высоты местности над уровнем моря.

Такое представление сезонного хода климатических величин имеет глубокое физическое обоснование, базирующееся на характере сезонного хода инсоляции нашей планеты (как известно, в тропической зоне амплитуда годовой и полугодовой гармоник инсоляции сравнимы по порядку величины; в умеренных широтах резко выделяется годовая гармоника; в полярных широтах только в первом приближении можно использовать такого типа аппроксимацию из-за резкого перехода одного сезона к другому). При анализе сезонного хода интенсивности атмосферных осадков для некоторых физико-географических регионов (к примеру, для юго-западных регионов Европы) соотношение амплитуд годовой и полугодовой гармоник используют в качестве индикатора мест зарождения и физической природы синоптических процессов, формирующих региональные осадки (над Атлантическим океаном или над Средиземным морем) [8]. Вероятно, что и для юго-восточной части Украины следовало бы провести анализ эффективности такого же типа индикаторов.

Наиболее простой из возможных вариантов параметризации для описания зависимости параметров $\{\Psi_0, a_c, a_s, b_c, b_s\}$ от географических координат и высоты местности над уровнем моря для равнинной части территории Украины (U_R) — линейное приближение, а именно:

$$\begin{aligned} G(\varphi, \lambda, h) &\rightarrow \{\Psi_0, a_c, a_s, b_c, b_s\}, \\ G &= G_0 + G_\varphi(\varphi - \varphi_0) + G_\lambda(\lambda - \lambda_0) + G_h h, \end{aligned} \quad (3)$$

где G_0 — среднее для рассмотренного физико-географического региона значение G , приведенное к уровню моря; G_φ — широтный градиент G (перепад на 1° широты); G_λ — долготный градиент G (перепад на 1° долготы); G_h — вертикальный градиент G (перепад на единицу высоты над уровнем моря); φ_0 и λ_0 — географические координаты (соответственно широта и долгота), соответствующие с определенной точностью географическому центру U_R .

Использование линейного приближения (3) является наиболее жестким (и, видимо, по настоящему единственным!) ограничением предлагаемой модели пространственно-временной трансформации климатических полей Украины для U_R . Возможность применения такого приближения для параметризации зависимости G от географических координат местности связана со слишком малыми географическими размерами территории Украины ($\Delta\varphi \sim 5^\circ$, $\Delta\lambda \sim 20^\circ$) — и никаких дополнительных физических соображений привлекать нет смысла. Однако применение линейного приближения для аппроксимации зависимости G от h может вызывать определенные возражения.

Очевидно, что лишь для так называемых открытых ландшафтов [3, 7] при сравнительно небольших значениях h в некотором первом приближении зависимость метеовеличин от h можно аппроксимировать линейным приближением. При этом абсолютно не будет учитываться влияние на G дополнительных эффектов, связанных с резко выраженными орографическими особенностями местности (ORO), а именно:

наветренный гидродинамический эффект, когда резко выраженное орографическое образование ORO расположено впереди и сравнительно недалеко от рассматриваемого ре-

гиона (с точки зрения среднего переноса тропосферных воздушных масс U), к примеру некоторые регионы Закарпатской Украины;

подветренный гидродинамический эффект, когда рассматриваемый регион с точки зрения переноса воздушных масс U расположен сравнительно недалеко позади ОРО, к примеру, некоторые регионы Прикарпатской Украины;

эффект практически “замкнутого” климатического региона, когда географическое расположение ОРО способствует формированию климатических условий, связанных только с местными геофизическими условиями, к примеру Южный берег Крыма.

В дальнейшем рассматривается пространственно-временная трансформация современного климата равнинной части Украины, т.е. только такой ее части, на которой приведенными выше эффектами от влияния ОРО можно практически пренебречь и где высота ландшафтов над уровнем моря не превышает 350 м (средняя высота ландшафтов U_R составляет примерно 165 м). Эти условия, как достаточные, но не обязательно необходимые, установлены нами путем анализа имеющихся эмпирических материалов.

Эмпирическое подтверждение основных принципов предлагаемой полуэмпирической модели регионального климата равнинной части Украины. Приведенные выше соображения могут играть лишь эвристическую роль. Только путем сопоставления результатов модельных расчетов с данными прямых инструментальных наблюдений на метеостанциях Украины может быть подтверждена (или, наоборот, опровергнута!) эффективность параметризаций (1)–(3). Результаты соответствующего анализа приведены в табл. 2.

Приведенные в табл. 2 значения средних квадратических отклонений характеризуют не только ошибку аппроксимации пространственно-временной трансформации климатических полей для U_R с помощью соотношений (1)–(3), но и естественную пространственно-временную изменчивость рассматриваемых метеовеличин. Это замечание в наибольшей мере относится к составляющим $\text{trn}\{\Omega\}$, которые характеризуют современную тенденцию в динамике климата на территории Украины. В результате проведенного анализа материалов инструментальных наблюдений нами было установлено, что значения составляющих динамики климата $\text{trn}\{\Omega\}$ (и для приземной температуры, и для атмосферных осадков) составляют практически случайную совокупность для территории Украины. Детерминированные внешними условиями тенденции в поведении динамики регионального климата Украины формируются в виде весьма слабого сигнала на фоне огромного случайного шума. Полагаем, что именно использованная в данном исследовании методика статистического анализа результатов инструментальных наблюдений и позволяет при наиболее слабых допущениях выявить “полезный” сигнал на фоне большого метеорологического случайного шума. В связи с этим отметим, что при такой постановке задачи речь может идти не об аппроксимации эмпирических данных теми или иными функциональными соотношениями, а о выделении из большого шума статически значимого физического сигнала. Для

Таблица 2. Среднеквадратические отклонения эмпирических оценок метеовеличин от результатов их модельных расчетов для равнинной части территории Украины

Метеовеличина	Температура, °C			Атмосферные осадки, мм/сут		
	$\text{ngm}\{T\}$	$\text{trn}\{T\}$	$\text{var}\{T\}$	$\text{ngm}\{P\}$	$\text{trn}\{P\}$	$\text{var}\{P\}$
Среднемесячная	0,66	0,70	0,24	0,23	0,43	0,17
Среднегодовая	0,33	0,40	0,05	0,12	0,22	0,07

Примечание. Параметры $\text{trn}\{T\}$ и $\text{trn}\{P\}$ нормированы на 100 лет.

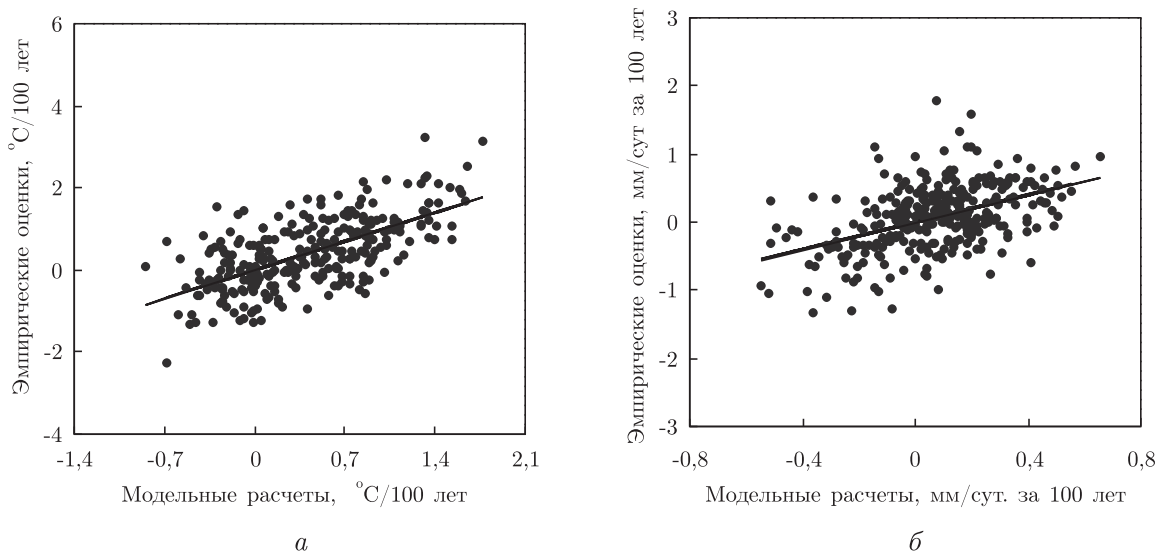


Рис. 1. Сравнение модельных расчетов с эмпирическими оценками коэффициентов линейных трендов среднемесячных приземных температур (а) и месячных сумм атмосферных осадков (б) для равнинной части территории Украины

иллюстрации этих соображений на рис. 1 сопоставлены результаты модельных расчетов с эмпирическими оценками коэффициентов линейных трендов среднемесячных температур и месячных сумм осадков для некоторых метеостанций Украины (~ 25), период наблюдений на которых составляет более 100 лет и количество пропусков данных не превышает 30%.

С учетом изложенных выше соображений на основании результатов, приведенных в табл. 2, можно сделать вывод, что полумпирическая модель (1)–(3) адекватно описывает пространственно-временную трансформацию современного регионального климата, по крайней мере, той части территории Украины U_R , для которой высота ландшафтов над уровнем моря не превышает 350 м и где приведенными выше эффектами от выраженных орографических особенностей можно пренебречь.

1. Монин А. М., Берестов А. А. Новое о климате // Вестн. РАН. – 2005. – **75**, № 2. – С. 126–138.
2. Волощук В. М., Бойченко С. Г. Клімат – статистичний режим випадкових метеорологічних процесів // Вісн. Київ. ун-ту ім. Тараса Шевченка. Сер. геогр. – 2002. – Вип. 48. – С. 27–32.
3. Бойченко С. Г., Волощук В. М., Дорошенко І. А. Закономірності формування мікрокліматичних умов відкритих ландшафтів України // Проблеми ландшафтного різноманіття України. – Київ, 2000. – С. 243–247.
4. Волощук В. М., Бойченко С. Г. Напівемпірична модель трансформації кліматичного поля приземних температур повітря на території України в 20 ст. // Наук. праці УкрНДГМІ. – 2001. – Вип. 249. – С. 5–23.
5. Voloshchuk V. Semi-empirical statistical models of seasonal and geographic distribution of precipitation in the territory of Ukraine // Proc. of Third Inter. Conf. on Water Resources and Environment Research. – Germany. – 2002. – **3**. – P. 197–202.
6. Voloshchuk V., Boychenko S., Stepanenko S., Trofimchuk A. Semi-empirical scenarios of possible global and regional ecological consequences associated with further global warming // Proc. of the 30th Inter. Conf. Pacem in Maribus. – Kiev, 2003. – Sevastopol, 2004. – P. 624–635.
7. Бойченко С. Г., Сердюченко Н. Н. Оценка зависимости параметров региональных климатических полей от высоты местности над уровнем моря // Геофиз. журн. – 2005. – № 5. – С. 858–867.
8. Valero F., Doblas F. J., Gonzales J. F. On long-term evolution of seasonal precipitation in southwestern Europe // Annales Geophys. – 1996. – **14**, No 9. – P. 976–985.

9. Giorgi F., Bi X., Pal J. S. Mean interannual variability and trends in a regional climate change experiment over Europe. I. Present-day climate (1961. – 1990) // *Climate Dynamics*. – 2004. – **22**. – P. 733–756.
10. Benjamin A., Cash E., Edwin K. Origin of regional climate differences: role of boundary conditions and model formulation in two GCMs // *Ibid.* – 2005. – **25**. – P. 709–723.
11. Хромов С. П., Мамонтова Л. И. Метеорологический словарь. – Ленинград: Гидрометиздат, 1974. – 568 с.
12. Бойченко С. Г., Волощук В. М. Основные закономерности современной динамики глобального температурного режима тропосферы // *Доп. НАН України*. – 2006. – № 5. – С. 106–109.
13. Гончарова Л. Д., Серга Е. М., Школьный Е. П. Клімат і загальна циркуляція атмосфери. – Київ: Київ. нац. ун-т ім. Тараса Шевченка, 2005. – 251 с.
14. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах: От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации. – Москва: Мир, 1979. – 485 с.

*Институт геофизики им. С. И. Субботина
НАН Украины, Киев*

Поступило в редакцию 19.07.2006

УДК 551.524.3+551.513.11+519.246.8

© 2007

Академик НАН Украины **В. Н. Еремеев, Т. М. Баянкина,
А. Н. Жуков, Н. Е. Лебедев, В. В. Пустовойтенко, А. А. Сизов,
Л. И. Сухих**

О волновых свойствах пространственной изменчивости полей температуры воздуха в Северной Евразии на межгодовых масштабах

The analysis of peculiarities of the spatial distribution of the amplitudes of some harmonics of time series spectra of the air ground temperature above the Northern Eurasia reveals their intraspectral variability not only in time, but also in space. This feature indicates a fractal-wave structure of the spectral variability of the processes and the fields in time. The obtained results allow us to assume a similar structure of the variability in space.

Разрабатываемый авторами метод внутриспектрального анализа (ВСА) [1–3] может быть использован в исследованиях закономерностей изменчивости характеристик спектральной структуры (т. е. ритмодинамики) природных процессов не только по времени, но и по пространству. Ряд предположений, сделанных в связи с этим в статье [3], сводится к тому, что для квазипериодических процессов в атмосфере и гидросфере общий характер изменчивости по времени и по пространству может быть подобным. Другими словами, если для ритмодинамики по времени параметров какого-либо процесса характерны свойства внутриспектральной изменчивости (ВСИ) и фрактально-волновой структуры такой изменчивости (ФВСИ), то эти свойства также должны наблюдаться и для пространственной изменчивости этих же параметров.

Предложенное в [3] понятие ФВСИ означает, что, если временная изменчивость процесса на каком-либо масштабе может быть в основном сведена к суперпозиции группы нескольких доминирующих квазипериодических колебаний, каждое из которых также может быть