

Н.Г. Сербов, к.г.н., **Д.Е. Сухарев**, к.ф.-м.н., **А.К. Балан**, ст. преп., **А.А. Дудинов**, асс.
Одесский государственный экологический университет

МНОГОФАКТОРНОЕ СИСТЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНО ВЫСОКИХ ПАВОДКОВ И ВРЕМЕННЫХ ФЛУКТУАЦИЙ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ (ФОСФАТОВ) В РЕЧНОЙ ВОДЕ

На основе ранее развитого метода описания экстремальных гидрологических явлений, базирующегося на многофакторном системном подходе и мультифрактальном формализме, проведено моделирование характеристик экстремально высоких паводков (на примере р.Дунай) и флуктуационных временных трендов изменения концентраций фосфатов для ряда водосборов Малых Карпат.

Ключевые слова: метод многофакторного системного моделирования, мультифрактал, экстремально высокие паводки, загрязнение водной среды

Введение. В работах [1-7] были разработаны новые подходы к решению ряда фундаментальных задач физики гидрологического цикла и прикладной экологии, базирующиеся на многофакторном системном подходе и мультифрактальном формализме. В последние годы развитие подобных многофакторных мультифрактальных моделей стало одной из приоритетных и актуальных задач современной гидрологии и гидроэкологии, традиционно включающих также и построение высоко эффективных, адекватно отражающих физику гидрологического и гидроэкологического цикла математических моделей с достаточно высокой степенью корректности и прогнозируемости [1-15]. Разумеется, указанный класс моделей уступает с точки зрения полноты и физической корректности описания гидрологических и гидроэкологических систем классическим статистическим, а также динамическим методам, базирующимся на использовании уравнений типа Сен-Венана либо полной системы уравнений Навье-Стокса. Однако, системные подходы позволяют относительно просто (с вычислительной точки зрения) и быстро получить крайне ценную информацию о характеристиках временных рядов гидрологических и гидроэкологических систем. Дело в том, что классические динамические модели, как правило, основываются на численном интегрировании уравнений типа Навье-Стокса и, естественно, сталкиваются с многочисленными проблемами реализации исходных численных алгоритмов при конкретном описании гидрологических систем. С другой стороны, и многофакторные системные модели требуют адекватной калибровки и детального изучения внутренних симметрий искомым моделям. В частности, здесь возникает задача построения оптимальных функций отклика и, фактически, оптимальной функции управления. В последние годы для этих целей привлекаются стандартные методы теории оптимального управления и математического (нейросетевого) моделирования (см., напр., [6]). Разумеется, системные модели также могут быть максимально упрощены [12-14], однако в этом случае существенно падают и их прогностические возможности. С другой стороны, естественно рассматривать относительно простые системные модели с «множеством входов» и «одним выходом», в которых, в отличие от известного класса моделей типа «black-box» [4,7,12-14], более адекватно отражены физические особенности гидрологического цикла. Вполне приемлемая эффективность таких моделей, удовлетворительное согласие результатов моделирования с данными наблюдений ранее подтверждены в целом ряде работ на примере тестовых расчетов, напр., расходов, соответствующих экстремальным паводкам 1996, 1997гг. для р. Дунай, а также моделирования характеристик временных

трендов флуктуационных изменений концентраций различных загрязняющих веществ (нитратов, хлоридов и сульфатов) для ряда водосборов Малых Карпат [1-7]. В данной работе, продолжая исследование [1-7], многофакторный системный подход (улучшенная “black-box” модель) и мультифрактальный формализм применены для моделирования экстремально высоких паводков для р. Дунай и изучения характеристик временных флуктуационных изменений концентраций загрязняющих веществ (фосфатов) в ряде водосборов Малых Карпат.

Метод расчета. Поскольку основные блоки используемого многофакторного системного подхода ранее детально изложены [1-7], ниже мы ограничимся лишь ключевыми моментами. Как обычно [1-4], в рассмотрение вводится характеристическая функция выхода нелинейной системы, определяемая суммой нелинейной компоненты, определяемой мгновенным и запаздывающим откликом гидрологической (гидроэкологической) системы, и линейной компоненты, связанной с линейным откликом системы. Мастерное уравнение для функции выхода

$$Q_t = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{n(j)} \sum_{k=i}^{n(j)} U_{i,k}^{(j)} P_{t-i+1}^{(j)} P_{t-k+1}^{(j)} + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{k(j)} U_{i+n}^{(j)} P_{t-(i+n)+1}^{(j)}, \quad (1)$$

где $j=1,2,\dots,J$ – число независимых входов (в т.ч., обусловленных дождевыми осадками), J – число миниводосборов (в сумме дающих полный водосбор), n – число временных интервалов, которые соответствуют дождевым осадкам, дающим вклад в мгновенную и запаздывающую составляющие стока (нелинейная часть общей «памяти» водосбора), l – число аналогичных временных интервалов (линейная часть общей «памяти»), $(n+l)$ – длина полной «памяти» модели, P – матрица осадков j входной серии, соответствующей j -ой миниводосборной площади; $U_{i,k}$ – обозначает дискретные серии ординат нелинейной части функции отклика, которые суммируются в коэффициент стока, U_i – то же для линейной части.

Модель калибруется по числу серий отдельных данных по дождевым осадкам и соответствующему стоку. Уравнение (1) с учетом p ($p=1, NN$) числа серии данных записывается в следующем виде

$$Q_t^p = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{n(j)} \sum_{k=1}^{n(j)} U_{i,k}^{(j)} P_{t-i+1}^{(j),p} P_{t-k+1}^{(j),p} + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{l(j)} U_{i+n}^{(j)} P_{t-(i+n)+1}^{(j),p}. \quad (2)$$

Решение уравнения (2) для калибровочной серии N значений расходов Q_1, Q_2, \dots, Q_N естественно представимо в вектор-матричной форме

$$Q = P^{(1)}U^{(1)} + P^{(2)}U^{(2)} + \dots + P^{(J)}U^{(J)}. \quad (3)$$

Соответственно, уравнение (1) может быть переписано в виде

$$Q = PU, \quad (4)$$

где P – матрица размером (N, M)

$$P = [P^{(1)}P^{(2)}, \dots, P^{(J)}] \quad (5)$$

и $M = \sum_{j=1}^J mn(j)$. В результате $\{P^T P\}$ является квадратной $(M \times M)$ симметричной матрицей и U – $(M \times 1)$ вектор (столбец). Далее решение уравнения (3) осуществляется

стандартными численными методами. Для изучения характеристик временных рядов флуктуаций концентраций загрязняющих веществ в речной воде используется версия [1-4] мультифрактального формализма.

Результаты расчета и выводы. В [1-3] в качестве приложения метода были выполнены оценки паводковых расходов и проведено сравнение с наблюдаемыми на участке р. Дунай от ст. Девин (Братислава) до ст. Нагимарос (см. детальное описание участка в работах [16,17]). Все необходимые для реализации модели данные взяты из отчета [17] (а также ссылки, приведенных там). Модель калибровалась по данным 1991, 1992 гг. В [1-3] приведены результаты тестовых расчетов (реализовывался 3-входовый «упрощенный» вариант модели и с «ехр» нелинейной функций отклика [4]) вместе с эмпирическими данными. Тестовые расчеты продемонстрировали достаточно приемлемое согласие теории с данными эмпирических наблюдений. В табл. 1 представлены данные по наблюдаемым и рассчитанным расходам (в м³/с), соответствующим катастрофическим паводкам 1996, 1997гг. Используются следующие обозначения для станций: 1- Medved'ov (QME), 2- Komarno (QKO). Реализован 3-входовый «упрощенный» вариант модели с «солитонной» функцией отклика [4]. Детальный анализ полученных результатов и их сравнение с данными наблюдений показывает, что использованная версия модели обеспечивает достаточно приемлемое согласие искомых данных. Дальнейшее качественное и количественное улучшение модели может быть достигнуто за счет более адекватного учета нелинейности системы, а также более принципиальных коррекций, связанных с расширением и обобщением модели (1)-(5).

Таблица 1 – Измеренные [11] и рассчитанные расходы (в м³/с), соответствующие паводкам 1996, 1997 гг.

Год Дата	Измеренные значения		Рассч. данные (модель – «упрощ.»)		Рассч. данные (модель- «ехр»)		Рассч. данные (модель- «солитон»)	
	1	2	1	2	1	2	1	2
1996 09/07	--	8800	9680	8860	9657	8845	9645	8832
1996 10/06	--	8705	8742	8748	8731	8729	8718	8720
1997 31/07	5486	5276	5506	5320	5497	5303	5490	5290

Далее приведем результаты изучения временных флуктуационных трендов фосфатов для ряда речных водосборов Малых Карпат (с использованием данных экспериментальных гидрологических исследований, выполненных сотр. Института гидрологии Академии наук Словакии) [16,17]. Эмпирические данные по концентрациям фосфатов $n_{\text{эмп}}$ для ряда водосборов Малых Карпат за период 1991–1993гг. представлены в [16].

На рис. 1 приведены данные по временным вариациям концентрации фосфатов на ряде водосборов Малых Карпат (июнь 1991г. – декабрь 1993г.). Для изучения характеристик временных рядов флуктуационных изменений концентраций фосфатов применен многофакторный системный подход, базирующийся на использовании улучшенной “black-box” модели (1)-(5), а также мультифрактального формализма [1-7,18,19]. В табл. 2 представлены эмпирические и расчетные характеристики концентраций (мг·л⁻¹) фосфатов для ряда водосборов Малых Карпат ($n_{\text{эмп}}$ - эмпирические данные [16], $n_{\text{расч}}$ – оценка в рамках “black-box” модели).

Анализ полученных данных позволяет заключить, что многофакторный системный подход обеспечивает вполне приемлемое согласие расчетных и эмпирических значений, однако, имеющая место разница (до 15%) является указанием на необходимость уточнения калибровки моделей и их возможное уточнение путем конструирования более адекватных функции отклика. Интересно отметить, что для всех рассмотренных водосборов соответствующие фрактальные размерности лежат в интервале [1.5-2.4], что, в целом, коррелирует с аналогичными значениями фрактальных размерностей, характерными для временных рядов расходов воды и флуктуационных изменений концентраций загрязняющих веществ (нитратов, сульфатов) для аналогичных водосборов Малых Карпат [1-3].

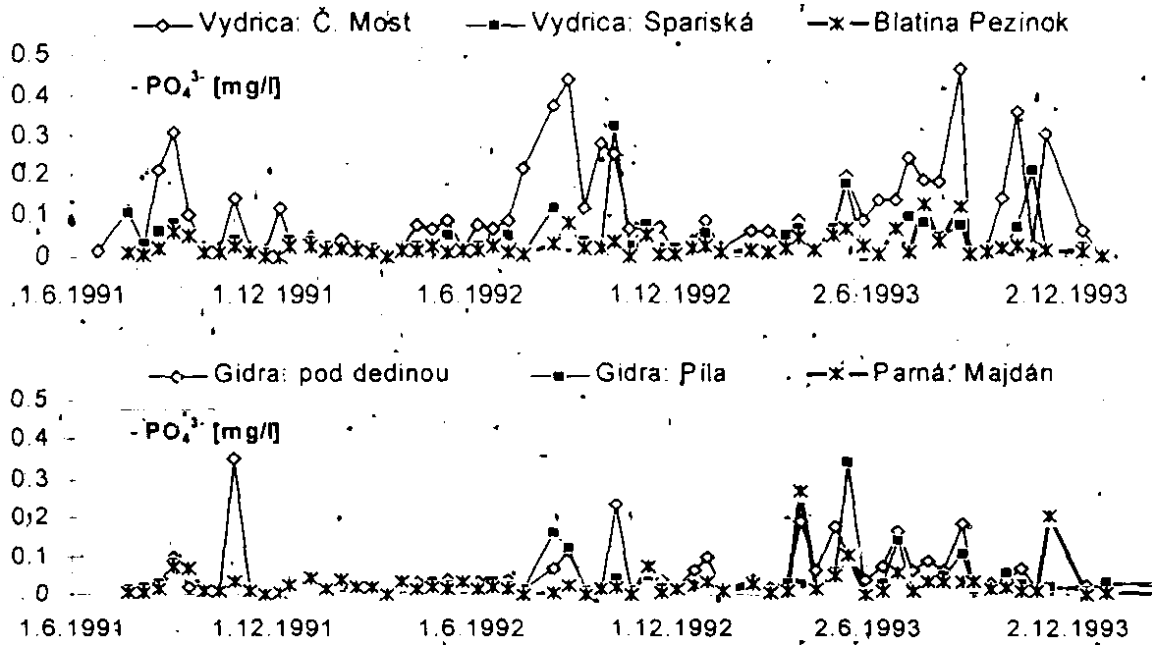


Рис. 1 – Временные вариации концентрации фосфатов (эмпирические данные) для ряда водосборов Малых Карпат (июнь 1991г. – декабрь 1993г.).

Таблица 2 – Эмпирические и расчетные характеристики концентраций (мг·л⁻¹) фосфатов для ряда водосборов Малых Карпат ($n_{эмп}$ – эмпирические данные [16], $n_{расч}$ – оценка в рамках “black-box” модели)

Водо-сборы	Vydrica- C.Most	Vydrica- Spariska	Blatina- Pezinok
Характеристики	$n_{эмп}$ $n_{расч}$	$n_{эмп}$ $n_{расч}$	$n_{эмп}$ $n_{расч}$
Среднее	0.110 0.13	0.046 0.052	0.024 0.028
Макс.	0.464 0.52	0.325 0.36	0.125 0.14

Водо-сборы	Gidra pod.ded	Gidra Pila	Parma- Majdan
Характеристики	$n_{эмп}$ $n_{расч}$	$n_{эмп}$ $n_{расч}$	$n_{эмп}$ $n_{расч}$
Среднее	0.059 0.068	0.039 0.044	0.027 0.030
Макс.	0.354 0.39	0.341 0.38	0.268 0.29

Список литературы

1. Сербов Н.Г., Балан А.К., Соляникова Е.П. Многофакторный системный и мультифрактальный подходы в моделировании экстремально высоких паводков (на примере р. Дунай) и временных флуктуаций концентраций загрязняющих веществ в речной воде// Вісник Одеського держ. екологічного ун-ту.- 2008.-№6.-С.7-13.
2. Сербов Н.Г., Сухарев Д.Е., Балан А.К. Моделирование экстремально высоких паводков на основе многофакторного мультифрактального подхода//Український гідрометеорологічний журнал.-2011.- №9.-С. 164-169.
3. Сербов Н.Г., Сухарев Д.Е., Балан А.К., Дудинов А.А. Моделирование экстремально высоких паводков и временных флуктуаций концентраций загрязняющих веществ (хлоридов) в речной воде// Вісник Одеського держ. екологічного ун-ту.-2011.-N11.-С.172-177.

4. Глушков А.В., Балан А.К., Баланюк Е.П. Метод многофакторного системного и мультифрактального моделирования в задачах расчета экстремальных гидрологических явлений//Ecology of Siberia, the Far East and the Arctic.-2003.-V.2.-P.113-118.
5. Глушков А.В., Хохлов В.Н., Сербов Н.Г., Балан А.К., Буякова Ю.Я., Баланюк Е.П. Низкоразмерный хаос во временных рядах концентраций загрязняющих веществ в атмосфере и гидросфере//Вісник Одеського держ. екологічного ун-ту.-2007.-№4.-С.337-348.
6. Loboda N.S., Glushkov A.V., Khokhlov V.N. Using meteorological data for reconstruction of the annual runoff series over an ungauged area: Empirical orthogonal functions approach to Moldova-Southwest Ukraine region//Atmospheric Research.-2005.-Vol.77.-P.100-113.
7. Глушков А.В., Балан А.К. Многофакторный мультифрактальный подход в задачах моделирования стока и краткосрочном гидрологическом прогнозе (на примере р.Дунай) // Метеорология, климатология, гидрология.-2004.-№48.-С.392-396.
8. Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока.-М.: Наука,1993.- 350С.
9. Islam M.N., Sivakumar B. Characterization and prediction of runoff dynamics: a nonlinear dynamical view// Adv. Water Res.-2002.-V.25, № 2- P.179-190.
10. Grassberger P, Procaccia I. Measuring the strangeness of strange attractors // Physica D.-1983.-Vol.9,№1-2.-P.189-208.
11. Лобода Н.С. Формализм функций памяти и мультифрактальный подход в задачах моделирования годового стока рек и его изменений под влиянием факторов антропогенной деятельности// Метеорология, климатология и гидрология.-2002.-№45.-С.140-146.
12. Maftuoglu R.F. New models for non-linear catchments analysis// Journal of Hydrology (Elsevier).-1984.- Vol.73.-P.335-357.
13. Maftuoglu R.F. Monthly runoff generation by non-linear models// Journal of Hydrology (Elsevier).-1991.- Vol.125.-P.277-291.
14. Kothiyari U.C., Arvanmuthan V., Singh V.P. Monthly runoff generation using the linear perturbation model// Journal of Hydrology (Elsevier).-1993.-Vol.144.-P.371-379.
15. Stewart M.D., Bates P.D., Anderson M.G., Price D.A., Burt T.P. Modelling floods in hydrologically complex lowland river reaches// Journal of Hydrology (Elsevier).-1999.-Vol.223.-P.85-106.
16. Pekarova P., Miklanek P., Konicek A., Pekar J. Water quality in experimental basins.- Nat. Rep.1999 of the UNESKO.-Project 1.1.-Intern. Water Systems.-1999.-98P.
17. Svoboda A., Pekarova P., Miklanek P. Flood hydrology of Danube between Devin and Nagymaros in Slovakia.- Nat. Rep.2000 of the UNESKO.-Project 4.1.-Intern. Water Systems.-2000.-96p.
18. Khokhlov V.N., Glushkov A.V., Loboda N.S., Bunyakova Yu.Y. Short-range forecast of atmospheric pollutants using non-linear prediction method//Atmospheric Environment (Elsevier).-2008.-Vol.42.- P.7284-7292.
19. Glushkov A.V., Loboda N.S., Khokhlov V.N., Lovett L. Using non-decimated wavelet decomposition to analyse time variations of North Atlantic Oscillation, eddy kinetic energy, and Ukrainian precipitation // Journal of Hydrology (Elsevier). – 2006. – Vol. 322, N1-4. – P.14-24.

Многофакторне системне моделювання екстремально високих паводків та часових флуктуацій концентрацій забруднюючих сполук (фосфатів) у річковій воді.

Сербов М.Г., Сухарев Д.Є., Балан А.К., Дудинов О.А.

На підставі раніше розвинутого методу опису екстремальних гідрологічних явищ, який базується на багатофакторному системному підході і мультифрактальному формалізмі, проведено моделювання характеристик екстремально високих паводків (на прикладі р. Дунай) та флуктуаційних часових трендів зміння концентрацій фосфатів у водозборах Малих Карпат.

Ключові слова: метод багатофакторного системного моделювання, мультифрактал, екстремально високі паводки, забруднення водного середовища

Multifactor system modelling the extreme hydrological floods and temporal fluctuations of the pollution substances (phosphate) concentrations in a river water.

Serbov N.G., Sukharev D.E., Balan A.K., Dudinov A.A.

It is carried out modelling characteristics of the extremely high floods (on the Danube river example) and fluctuation temporal trends of changing phosphates concentrations in the catchments of the Small Carpathians on the basis of earlier developed method combining the multi-factor systems approach and multi-fractal formalism.

Kew words: multi-factor systems modelling method, multi-fractal, extreme hydrological floods, pollution of water environment