

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНО ВЫСОКИХ ПАВОДКОВ И ВРЕМЕННЫХ ФЛУКТУАЦИЙ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В РЕЧНОЙ ВОДЕ

На основе нового метода описания экстремальных гидрологических явлений (паводков), базирующегося на многофакторном системном подходе и мультифрактальном формализме, проведено численное моделирование характеристик экстремально высоких паводков (на примере р. Дунай) и флуктуационных временных трендов изменения концентраций хлоридов в ряде водосборов Малых Карпат.

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

Введение. К числу ключевых задач современной гидрологии и гидроэкологии относится разработка высоко эффективных, адекватно отражающих физику гидрологического цикла математических моделей, обладающих достаточно высокой степенью корректности и прогнозируемости [1-11]. В работах [9,12,13] был развит новый подход к описанию экстремальных гидрологических явлений, в частности, высоких паводков, базирующийся на многофакторном системном подходе и мультифрактальном формализме. Как частный случай [9-13]), могут рассматриваться системные модели с «множеством входов» и «одним выходом». В отличие от известного класса моделей типа «black-box» [5-7] в таких моделях более адекватно отражены физические особенности гидрологического цикла. Тестовые расчеты и сравнение теоретических данных с данными наблюдений по расходам, соответствующим экстремальным паводкам 1996, 1997 г. на примере р. Дунай, продемонстрировали достаточную эффективность подхода и удовлетворительное согласие теории с данными наблюдений [12,13]. Следует иметь ввиду, что известные статистические и, разумеется, динамические модели расчета и прогноза характеристик речного стока, базирующиеся на использовании уравнений типа Сен-Венана, либо Навье-Стокса, обладают весьма важными достоинствами, но их корректная реализация по-прежнему далека от удовлетворительного уровня. Более простые многофакторные системные модели требуют, однако, более точной калибровки и более детального изучения внутренних симметрий искомым моделям. Особенно это касается проблемы поиска оптимальной функции отклика и, фактически, оптимальной функции управления. В последнем случае крайне полезным может оказаться применение методов теории оптимального управления и математического (нейросетевого) моделирования). В данной статье многофакторный системный подход (улучшенная “black-box” модель) и мультифрактальный формализм [9-15] применены для численного моделирования экстремально высоких паводков для р. Дунай (экстремальный сценарий) и временных трендов флуктуационных изменений концентраций загрязняющих веществ (хлоридов и подобных соединений) в ряде водосборов Малых Карпат с целью дальнейшей апробации методов. Отметим, что данная работа продолжает исследования, начатые в работах [9-13].

Метод расчета. В связи с тем, что основные блоки метода излагались детально в выше указанных работах, ниже мы ограничимся лишь ключевыми моментами метода. Согласно, [9] характеристическая функция выхода нелинейной системы определяется суммой нелинейной компоненты, определяемой мгновенным и запаздывающим откликом 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

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

Уравнение (1) может быть также записано в виде

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

где P – матрица размером (N, M)

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

и $M = \sum_{j=1}^J \text{mm}(j)$. 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 [7,10,11]. Для выявления фрактальных особенностей во временных рядах флуктуаций расходов воспользуемся версией [10] мультифрактального формализма. Детальное изложение искомого формализма дано в цитированной работе и ссылок в ней. Более детально численные аспекты определения спектра изложены, например, в [4-6].

Результаты расчета и выводы. В [9,13] 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 [7,10,11]). Все необходимые для реализации модели данные взяты из отчета [11] (и ссылок, приведенных там). Модель калибровалась по данным 1991, 1992 гг. В [9,13] приведены результаты тестовых расчетов (реализовывался 3-входовый «упрощенный» вариант модели и с «exp» нелинейной функцией отклика [9]) 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). Детальный анализ полученных данных и их сравнение с наблюдаемыми величинами показывает, что предложенная модель обеспечивает достаточно приемлемое согласие искомых данных и позволяет отследить количественно паводочные расходы в случае экстремальных событий. Очевидно, что более адекватный учет нелинейности системы, включая уточненное определение функции отклика и т.д., улучшает выходные данные модели, однако, на наш взгляд, здесь еще требуется дальнейшее тестирование.

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

Год Дата	Измеренные значения		Рассчитанные значения (Black-box –модель – «упрощенная»)		Рассчитанные значения (Black-box –модель- «exp»)	
	1	2	1	2	1	2
1996 09/07	--	8800	9680	8860	9657	8845
1996 10/06	--	8705	8742	8748	8731	8729
1997 31/07	5486	5276	5506	5320	5497	5303

Далее приведем результаты изучения временных флуктуационных трендов химического загрязнения (на примере хлоридов) для ряда речных водосборов Малых Карпат (с использованием данных экспериментальных гидрологических исследований, выполненных сотр. Института гидрологии Академии наук Словакии) [16]. Эмпирические данные по концентрациям хлоридов $n_{\text{эмп}}$ на ряде водозборов Малых Карпат за период 1991–1993гг представлены в [16]. На рис. 1 приведены данные по временным вариациям концентрации хлоридов на ряде водосборов Малых Карпат (июнь 1991г. – декабрь 1993г.). Для изучения временных трендов флуктуационных изменения концентраций хлоридов (и аналогичных соединений) представляется естественным применение многофакторного системного подхода, в частности, использование “black-box” модели типа (1)-(5), а также мультифрактального формализма [9-15]. Интересует, прежде всего, поиск феномена скейлинга и определение спектра фрактальных размерностей.

Далее, используя формализм Грассбергера-Прокаччи [3] и нелинейный метод прогноза [15,17], представляется возможным решение крайне важной задачи прогноза.

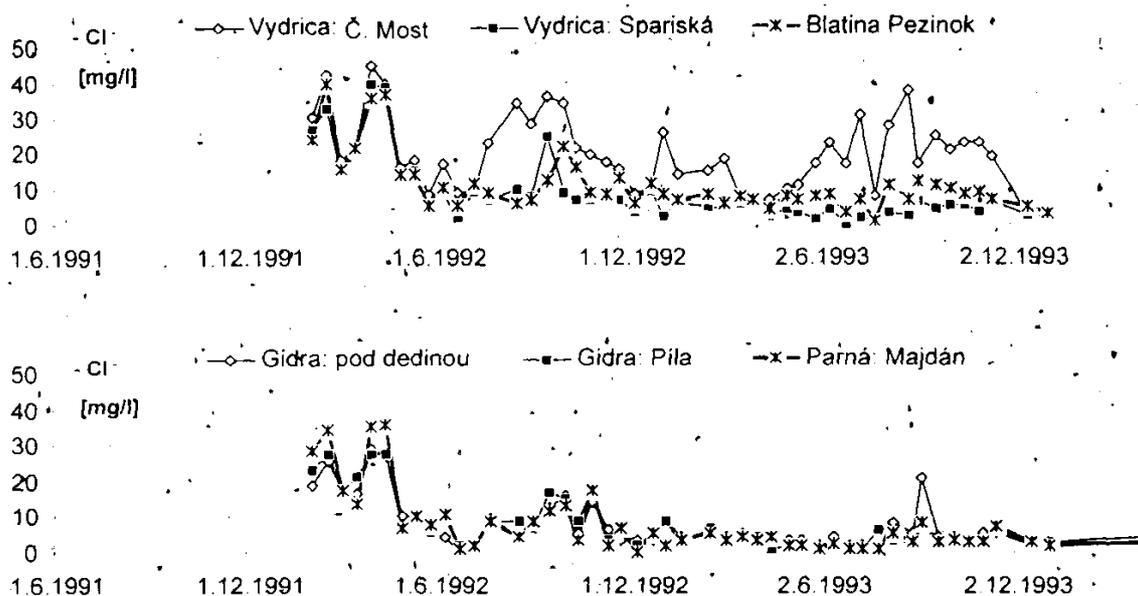


Рис. 2 – Временные вариации концентрации хлоридов (эмпирические данные) на водосборах Малых Карпат (июнь 1991г. – декабрь 1993г.)

В табл. 2 представлены эмпирические и расчетные характеристики концентраций ($\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$) хлоридов на водосборах Малых Карпат ($n_{\text{эмп}}$ – эмпирические данные [16], $n_{\text{расч}}$ – оценка в рамках “black-box” модели).

Таблица 2 – Эмпирические и расчетные характеристики концентраций ($\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$) хлоридов на водосборах Малых Карпат ($n_{\text{эмп}}$ – эмпирические данные [16], $n_{\text{расч}}$ – оценка в рамках “black-box” модели)

Водо-сборы	Vydrica-Č. Most		Vydrica-Spariska		Vydrica-Pezinok	
	$n_{\text{эмп}}$	$n_{\text{расч}}$	$n_{\text{эмп}}$	$n_{\text{расч}}$	$n_{\text{эмп}}$	$n_{\text{расч}}$
Характеристики						
Среднее	19.9	20.1	8.9	9.8	11.3	12.4
Мин.	2.0	2.2	0.1	0.3	0.9	1.3
Макс.	45.2	46.9	40.0	41.8	39.8	41.9

Водо-сборы	Gidra pod.ded		Vydrica-Pila		Parma-Majdan	
	$n_{\text{эмп}}$	$n_{\text{расч}}$	$n_{\text{эмп}}$	$n_{\text{расч}}$	$n_{\text{эмп}}$	$n_{\text{расч}}$
Среднее	7.2	7.8	6.8	7.7	6.8	7.6
Мин.	0.0	0.2	0.4	0.6	0.0	0.3
Макс.	28.9	30.7	27.9	29.4	36.1	37.9

Сравнение и анализ данных демонстрирует достаточно хорошую корреляцию расчетных и эмпирических значений, однако, имеющая место разница является указанием на возможное улучшение модели, в частности, введение более адекватной

функции отклика. Отметим также, что для всех рассмотренных водосборов соответствующие фрактальные размерности лежат в интервале [1.3-2.2], что, в общем, коррелирует с аналогичными значениями фрактальных размерностей, характерными для временных рядов расхода воды. Искомый эффект является аналогом более фундаментального гидроэкологического феномена генезиса фрактальных размерностей в родственных (фрустрированных) динамических системах [18-20]. В любом случае представляет значительный интерес как дальнейшее развитие моделей, использованных в работе, так и дальнейшее изучение временных трендов флуктуационных изменений концентраций других загрязняющих веществ.

Список литературы

1. *Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г.* Формирование речного стока.-М.: Наука,1993.
2. *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.
3. *Grassberger P, Procaccia I.* Measuring the strangeness of strange attractors // *Physica D.*-1983.-Vol.9,№1-2.-P.189-208.
4. *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.
5. *Maftuoglu R.F.* New models for non-linear catchment analysis// *J.Hydrol.*-1984.-Vol.73.-P.335-357.
6. *Maftuoglu R.F.* Monthly runoff generation by non-linear models// *J.Hydrol.*-1991.-Vol.125.-P.277-291.
7. *Kothyari U.C., Arvanmuthan V., Singh V.P.* Monthly runoff generation using the linear perturbation model// *J.Hydrol.*-1993.-Vol.144.-P.371-379.
8. *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; The Netherlands).*-1999.-Vol.223.-P.85-106.
9. *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.
10. *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; The Netherlands).* – 2006. – Vol. 322,N1-4.–P.14-24.
11. *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.
12. *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.
13. *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 ОДЕКУ.- 2008.-№6.-С.7-13.
14. Svoboda A., Pekarova P., Miklanek P. Flood hydrology of Danube between Devin and Nagymaros in Slovakia.- Nat. Rep.2000 of the UNESCO.-Project 4.1.-Intern.Water Systems.-2000.-96p.
 15. 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; The Netherlands).-2008.-Vol.42.-P.7284–7292.
 16. Pekarova P., Miklanek P., Konicek A., Pekar J. Water quality in experimental basins.- Nat. Rep.1999 of the UNESCO.-Project 1.1.-Intern.Water Systems.-1999.-98P.
 17. Глушков А.В., Хохлов В.Н., Сербов Н.Г., Балан А.К., Бунякова Ю.Я., Баланюк Е.П. Низкоразмерный хаос во временных рядах концентраций загрязняющих веществ в атмосфере и гидросфере// Вісник ОДЕКУ.-2007.-№4.-С.337-348.
 18. Glushkov A.V., Rusov V.D., Loboda N.S., Khokhlov V.N., Khetselius O.Y., Svinarenko A.A., Prepelitsa G.P. On possible genesis of fractal dimensions in the turbulent pulsations of cosmic plasma – galactic-origin rays – turbulent pulsation in planetary atmosphere system// Advances in Space Research.-2008.-Vol.41.-P.1713-1716.
 19. Glushkov A.V., Khokhlov V.N., Loboda N.S., Serbov N.G., Zhurbenko K. Signatures of low-dimensional chaos in hourly water level measurements at coastal site of Mariupol, Ukraine// Stochastic Environment Res. Risk Assess. (Springer).-2008.-Vol.22,№6.-P.777-788.
 20. Глушков А.В., Хохлов В.Н., Препелица Г.П., Цененко И. Временная изменчивость содержания атмосферного метана: влияние североатлантической осцилляции// Оптика атмосферы и океана.-2004.-Т.14,№7.-С.219-223.

Моделювання екстремально високих паводків та часових флуктуацій концентрацій забруднюючих сполук у річковій воді. Сербов М.Г., Сухарев Д.Є., Балан А.К., Дудінов О.А.

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

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

Modelling the extreme hydrological floods and temporal fluctuations of the pollution substances concentrations in a river water. Serbov N.G., Sukharev D.E., Balan A.K., Dudinov A.A.

It is carried out numerical modelling characteristics of extreme hydrological events, extremely high floods (on the Danube river example) and fluctuation temporal trends of changing chlorides concentrations in the catchments of the Small Carpathians on the basis of the new approach combining the multi-factor systems approach and multi-fractal formalism.

Key words: multi-factor systems approach, multi-fractal, extreme hydrological floods, pollution of water environment