

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАВОДКОВ И ВРЕМЕННЫХ ФЛУКТУАЦИЙ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В РЕЧНОЙ ВОДЕ НА ОСНОВЕ МНОГОФАКТОРНОГО СИСТЕМНОГО ПОДХОДА

На основе нового метода описания экстремальных гидрологических явлений (паводков), базирующегося на многофакторном системном подходе и мультифрактальном формализме, проведено численное моделирование характеристик ряда уникальных паводков для бассейна р. Rybaric (плоскогорье Strazov, Словакия) и флуктуационных временных трендов изменения концентраций нитратов для ряда водосборов в пяти регионах Малых Карпат.

Ключевые слова: *метод многофакторного системного моделирования, паводки, временные тренды изменения концентраций нитратов*

Введение. Развитие количественно приемлемых и достаточно эффективных математических моделей для описания паводковых явлений в гидрологии и одновременно адекватно отражающих сложнейшую физику гидрологического цикла, а также динамику изменения концентраций загрязняющих веществ по-прежнему относится к числу наиболее фундаментальных и крайне актуальных ключевых задач современной гидрологии [1-13]. Разумеется, к настоящему времени разработаны различные классы, в частности, динамических и вероятностно-стохастических моделей расчета и прогноза характеристик речного стока, динамики загрязнения речных систем. Как правило, искомые динамические модели базируются на использовании уравнений типа Сен-Венана, либо Навье-Стокса, обладая при этом весьма важными достоинствами (ясная физическая суть моделей, вполне допустимые аппроксимации и т.д.). Тем не менее, их корректная реализация по-прежнему далека от удовлетворительного уровня. В последнее десятилетие активно стали развиваться более простые с физической и вычислительной точки зрения, однако, более эффективные с точки зрения количественного решения указанных выше проблем модели, обычно называемые системными (или кибернетическими). В то же время, успех применения этих моделей во многом определяется корректностью их калибровки, а также максимально точным учетом так называемых внутренних симметрий. В серии работ [13-20] был развит новый подход к описанию экстремальных гидрологических явлений, в частности, экстремально высоких паводков, базирующийся на многофакторном системном подходе и мультифрактальном формализме. Как частный случай искомого подхода [17-20]), рассматривались системные модели с «множеством входов» (в простейшем случае одним) и «одним выходом». В отличие от известного класса моделей типа «black-box» моделей [2-4] 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 [16-20]. В данной работе многофакторный системный подход («black-box» модель) применен для численного моделирования характеристик ряда уникальных паводков для бассейна р. Rybaric (плоскогорье Strazov, Словакия) и флуктуационных временных трендов изменения концентраций нитратов для ряда водосборов в пяти регионах Малых

Карпат с целью дальнейшей апробации и исследования возможностей системного подхода.

Метод расчета. Остановимся кратко на ключевых моментах метода расчета. Полное изложение метода дано в работах [13,17-20]. Фундаментальной характеристикой модели является, согласно [13], характеристическая функция выхода нелинейной системы, которая определяется суммой нелинейной компоненты, определяемой мгновенным и запаздывающим откликом системы, и линейной компоненты, связанной с линейным откликом системы. Мастерное уравнение для функции выхода

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

где $j=1,2,\dots,J$ – число независимых входов (в т.ч., обусловленных дождевыми осадками), J – число мини водосборов (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 мини-водосборной площади; $U_{i,k}$ – обозначает дискретные серии ординат нелинейной части функции отклика, которые суммируются далее, скажем, в коэффициент стока, U_i – то же для линейной части.

Модель калибруется по числу серий отдельных данных по дождевым осадкам (альтернативные параметры входа – начальные данные о загрязняющих веществах) или другим внешним воздействиям 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 $M = \sum_{j=1}^J mn(j)$. 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 [7,10,11]. Более детально численные аспекты определения спектра изложены, например, в [4-6].

Результаты расчета и выводы А. В [18] в качестве приложения метода были выполнены оценки паводковых расходов и проведено сравнение их с наблюдаемыми

для бассейна р. Rybaric (плоскогорье Strazov, Словакия) (см. детальное описание см. в работе [12,18]). Все необходимые для реализации модели данные взяты из отчетов [11,12] (и ссылок, приведенных там). Модель калибровалась по данным 1991-1993 гг. В [16] приведены результаты тестовых расчетов (реализовывался 3-входный вариант модели [16]) вместе с эмпирическими данными, а также результатами расчетов в рамках модели NONLIN для р. Дунай [12]. Тестовые расчеты для р. Дунай продемонстрировали достаточно приемлемое согласие теории с данными эмпирических наблюдений.

В табл. 1 представлены данные по наблюдаемым [11] и рассчитанным расходам (в л/с), соответствующим паводкам в период 17-21 марта 1996г р. Rybaric. Детальный анализ полученных данных и их сравнение с наблюдаемыми данными показывает, что наша модель (реализовывался 3-входный вариант модели) обеспечивает достаточно хорошее согласие искомых данных и позволяет отследить количественно адекватно аппроксимировать расходы, очевидно, даже и даже в случае экстремальных событий. Естественно, модель допускает дальнейшее улучшение за счет более адекватного учета нелинейности системы, прямого включения в схему функций отклика и т.д.

Таблица 1 - Наблюдаемые и рассчитанные расходы (18.03.1996г., р. Rybaric)

Продолжит. (часы)	Наблюдаемые значения расхода	Рассчитанные значения расхода
1	0.5	0.5
2	1.0	1.0
4	9.7	10.3
6	32.2	33.9
8	43.7	45.8
10	32.1	35.4
12	17.5	19.0
14	8.8	9.5
16	6.9	7.5
20	4.2	4.4
24	1.7	1.9

Далее приведем результаты изучения временных флуктуационных трендов химического загрязнения (на примере нитратов и аналогичных соединений) для ряда речных водосборов в пяти регионах Карпат (с использованием данных экспериментальных гидрологических исследований, выполненных сотр. Института гидрологии Академии наук Словакии) [12]. На рис. 1 приведены эмпирические данные (ежедневных замеров) $n_{\text{эмп}}$ в семи водосборах в течение гидрологического года 1988/1989 (из работ [12,18]). В [12] также приведены детальные количественные данные (ежедневных замеров) по значениям концентраций хлоридов в искомых водосборах за указанный выше период. Для изучения временных трендов флуктуационных изменения концентраций хлоридов и аналогичных соединений, как и в случае выполненных ранее исследований динамики флуктуационных изменений концентраций нитратов, фосфатов и др. (см. [16-20]) представляется целесообразным применение многофакторного системного подхода, в частности, использование “black-box” модели типа (1)-(5), а также мультифрактального формализма [13-16,21]. В табл. 2 представлены эмпирические данные по максимальному, минимальному, среднему (месячные) значениям стока R и входному на ед. площади водосбора потоку нитратов L . Также в

этой таблице приведены эмпирические ($n_{эмп}$) [12], интерполяционные ($n_{инт}$) [12] и расчетные ($n_{расч}$) в рамках “black-box” модели (1)-(5) значения концентраций нитратов в водосборах Lesny и Rybarik, причем вариант а соответствует простейшей 1-входовой версии модели [18], б – трех-входовой версии (данная работа). Как и следовало ожидать, последняя версия обеспечивает количественно более точное описание концентраций (за исключением среднего значения концентрации в случае водосбора Lesny). Разумеется, химическое загрязнение речной воды является результатом взаимодействия многих факторов, включая гидрологический, геологический, антропогенный факторы.

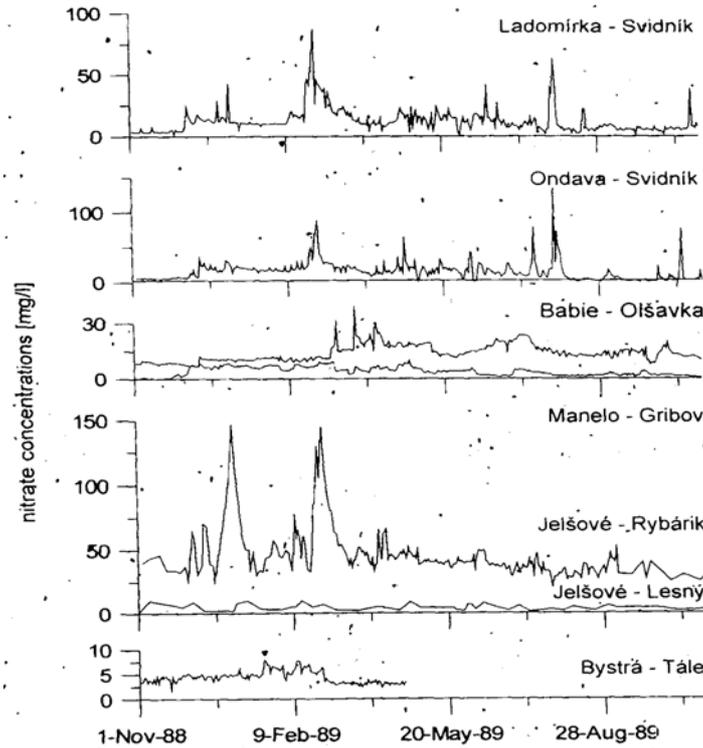


Рис. 1 - Эмпирические данные (ежедневных замеров) $n_{эмп}$ в семи водосборах в течение гидрологического года 1988/1989 (из работ [16]).

Таблица 2 – Максимальное, минимальное и среднее (месячные) значения стока R (мм), концентрации нитратов n ($мг \cdot л^{-1}$; $n_{эмп}$ - эмпирические данные [12]; $n_{инт}$ – интерполяционные значения [12]; $n_{расч}$ – наша оценка в рамках “black-box” модели (а: 1-входовой вариант [18]; б: 3-входовой вариант) и входного на ед. площади водосбора потока нитратов L ($кг \cdot месяц^{-1}$) в водосборах Lesny и Rybarik.

Водо-Сборы	Rybarik			Lesny		
	Макс.	Мин.	Среднее	Макс.	Мин.	Среднее
R	96,1	1,8	14,9	58,5	0,50	9,35
L	39,4	0,29	4,46	2,9	0,01	0,36
$n_{эмп}$	77,9	15,0	35,4	7,50	1,01	3,60
$n_{инт}$	56,3	25,8	36,1	6,31	1,50	3,30
$n_{расч-a}$	68,4	18,2	35,8	7,20	1,22	3,51
$n_{расч-b}$	72,5	16,4	35,6	7,38	1,13	3,44

Отсюда, очевидно, что простые системные (по существу, кибернетические) модели типа изложенной дают некое усредненное описание процессов с неявным учетом многочисленных физико-химических и географических факторов (см. также [9,21]). Действительно, уровень содержания и особенности распределения загрязняющих веществ в водной среде определяются совокупностью факторов, в частности, и близостью источников загрязнения, и физико-химическими свойствами веществ, и гидродинамическими, биогеохимическими, термодинамическими и др. условиями. Естественно, их следует рассматривать отдельно и явно, вводя соответствующие блоки. Тем не менее, даже простые системные подходы позволяют надежно установить корреляцию между величиной стока и значениями концентрации загрязняющих веществ, в частности, нитратов для всех экспериментально исследованных речных водосборов в пяти регионах Карпат.

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. *Maftuoglu R.F.* New models for non-linear catchment analysis// *Journal of Hydrology (Elsevier)*.-1984.-Vol.73.-P.335-357.
4. *Maftuoglu R.F.* Monthly runoff generation by non-linear models// *Journal of Hydrology (Elsevier)*.-1991.-Vol.125.-P.277-291.
5. *Kothyari 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.
6. *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.
7. *Гопченко Е.Д., Романчук М.Е.* Математическая модель для расчета характеристик экстремально высоких паводков и половодий на территории Придунайских озер// *Метеорология, климатология и гидрология*.-2001.-№42.-С.39-50.
8. *Найнал С., Иваненко А.Г.* Стохастическая модель гидрографа рек Суринама // *Метеорология, климатология и гидрология*.-1993.-№29.-С.32-47.
9. *Глушков А.В., Сафранов Т.А., Баланюк Е.П.* Флуктуации концентрации хлорированных углеводородов в экосистеме северо-западной части черного моря: анализ и моделирование на основе аппарата функций отклика и данных натурных наблюдений// *Метеорология, климатология, гидрология*.-2005.-№49.-С.527-535.
10. *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.
11. *Miklanek P., Kostka Z., Holko L.* Mountainous basins- The necessity of intercomposition of hydrological processes inside the basins.- *Nat. Rep.1200 Methods of hydrological basin comparison*.-Wallingford (UK).-2004.-P.46-56.
12. *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.
13. *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.

14. 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.
15. Glushkov A.V., Loboda N.S., Khokhlov V.N., Lovett L. Using non-decimated wavelet decomposition to analyze time variations of North Atlantic Oscillation, eddy kinetic energy, and Ukrainian precipitation // Journal of Hydrology (Elsevier). – 2006. – Vol. 322. – No. 1-4. – P. 14-24
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. Сербов Н.Г. Многофакторный системный и мультифрактальный подходы в моделировании среднемесячных расходов на примере р. Дунай// Український гідрометеорологічний журнал.-2010.-№5.-С.179-183.
20. Сербов Н.Г., Сухарев Д.Е., Балан А.К. Многофакторный системный и мультифрактальный подход к моделированию экстремально высоких паводков на примере р. Дунай // Український гідрометеорологічний журнал.-2010.-№7.-С.167-171.
21. 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.

Моделювання паводків та часових флуктуаций концентраций забруднюючих сполук у річній воді на основі багатофакторного системного підходу.

Сербов М.Г., Сухарев Д.Е., Балан А.К.

На підставі нового методу опису екстремальних гідрологічних явищ, який базується на багатофакторному системному підході і мультифрактальному формалізмі, проведено чисельне дослідження характеристик ряду унікальних паводків для водозбору Rybaric (плато Strazov, Словачія) та флуктуацийних часових трендів змінення концентраций нітратів для ряду водозборів у 5 регіонах Малих Карпат.

Ключові слова: метод багатофакторного системного моделювання, паводки, часові тренди зміни концентраций нітратів

Modelling the runoffs and temporal fluctuations of the pollution substances concentrations in a river water on the basis of a multi-factor systems approach.

Serbov N.G., Suharev D.E., Balan A.K.

It was carried out numerical modelling characteristics for a number of unique hydrological events for basin (highlands Strazov, Slovakia) and fluctuation temporal trends of changing nitrates concentrations in some catchments in 5 regions of the Small Carpathians on the basis of the new approach combining the multi-factor systems approach and multi-fractal formalism.

Kew words: multi-factor systems modeling approach, runoffs, temporal trends of nitrates concentration changes