

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

МНОГОФАКТОРНЫЙ СИСТЕМНЫЙ И МУЛЬТИФРАКТАЛЬНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЭКСТРЕМАЛЬНО ВЫСОКИХ ПАВОДКОВ НА ПРИМЕРЕ р. ДУНАЙ

На основе нового метода описания гидрологических систем, базирующегося на многофакторном системном подходе и мультифрактальном формализме, проведено моделирование характеристик экстремально высоких паводков (на примере р. Дунай). Выполнен анализ флуктуационных временных трендов среднемесячных расходов (1989-1998гг.) и оценены величины фрактальных размерностей.

Ключевые слова: метод многофакторного системного моделирования, экстремально высокие паводки.

Введение. В современной гидрологии к числу актуальнейших задач относится разработка высоко эффективных, адекватно отражающих физику гидрологического цикла математических моделей, обладающих достаточно высокой степенью корректности и прогнозируемости. Несмотря на наличие огромного числа различных моделей, в т.ч., для моделирования опасных гидрологических явлений (экстремально высоких паводков, наводнений и др.) представляется, что адекватное, количественно надежное описание искомых явлений, по-видимому, еще далеко от своего удовлетворительного уровня [1-20].

Среди них традиционно выделяют так называемые динамические модели расчета и прогноза, базирующиеся на использовании гидродинамических уравнений типа Навье-Стокса или более простого варианта гидродинамических уравнений типа Сен-Венана [1]. Хотя динамические модели обладают рядом весьма важных, хорошо известных достоинств, их корректная реализация по-прежнему далека от удовлетворительного уровня.

В настоящее время активно развивается альтернативное направление моделирования гидрологических характеристик, в рамках которого разработан ряд более простых в вычислительном отношении моделей типа «black-box» моделей [7-13], а также относительно новый класс моделей, основанных на использовании аппарата функций отклика [5-7]. В числе таких моделей следует упомянуть модель OSEU-Hydro-MSFR [12-16], которая основывается на многофакторном системном и мультифрактальном формализмах. Ранее бы проведены тестовые расчеты и детальное сравнение теоретических данных с данными наблюдений по среднесуточным, среднегодовым расходам на примере р. Дунай.

Как показано в работах [12-16], полученные теоретические результаты продемонстрировали достаточно высокую эффективность модели OSEU-Hydro-MSFR и удовлетворительное согласие теории с данными наблюдений [11]. В данной работе на основе модифицированной модели OSEU-Hydro-MSFR выполнено моделирование характеристик экстремально высокого паводка для р. Дунай (экстремальный сценарий). Также выполнен анализ флуктуационных временных трендов среднемесячных расходов (1989-1998гг.) и оценены величины фрактальных размерностей.

Метод расчета. Поскольку искомый подход детально излагался в ряде публикаций, здесь мы ограничимся лишь изложением основных блоков метода моделирования. Согласно, [14,16] 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 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 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 [12-16].

Для выявления фрактальных особенностей во временных рядах флуктуаций речного стока ранее обычно используется классическая версия мультифрактального формализма (детали в [13-20]). Для однородных фракталов скейлинг описывается одной фрактальной размерностью. Неоднородные объекты характеризуются спектром $D(q)$ фрактальных размерностей (фрактальная размерность равна $D(0)$, а функция $D(q)$ обычно трактуется как мультифрактальный спектр). Соответствующий сингулярный спектр $f(\alpha)$ меры μ ассоциирует хаусдорфову размерность с сингулярным показателем α , что позволяет вычислить степень сингулярности $N_\alpha(\varepsilon) = \varepsilon^{-f(\alpha)}$, где $N_\alpha(\varepsilon)$ есть число гиперкубов, необходимых для того, чтобы охватить меру и ε -размер каждого гиперкуба. Функция распределения Z извлекается из этого спектра

$$Z(q, \varepsilon) = \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} m_i^q(\varepsilon) \approx e^{\tau(q)} \text{ for } \varepsilon \rightarrow 0. \quad (6)$$

Здесь $\tau(q)$ есть спектр, который может быть получен путем преобразованием Лежандра сингулярного спектра $f(\alpha)$. Соответственно, из спектра $\tau(q)$ может быть получен спектр обобщенных фрактальных размерностей. Более детально численные аспекты определения спектра на основе классического фрактального формализма изложены, например, в [3,12].

Результаты расчета и выводы. Мы выполнили моделирование характеристик экстремально высоких паводков для р. Дунай (экстремальные сценарии) и провели анализ флуктуационных временных трендов изменения среднемесячных расходов на участке от станции Девин (Братислава) до станции Нагимарос р. Дунай в период с 1989г. по 1998г. Детальное описание искомого участка дано в работе [11]. Модельный расчет в целом продемонстрировал физически разумное согласие рассчитанных и эмпирических значений среднемесячных расходов на участке от станции Девин (Братислава) до станции Нагимарос р. Дунай в период с 1989г. по 1998гг. Модель обеспечивает прогноз временных флуктуаций среднемесячных расходов в близком согласии (отличие не превышает 10%) с эмпирическими данными [11]. Искомые данные по среднемесячным расходам воды на участке от станции Devin (Bratislava) до станции Achleiten р. Дунай в период с 1989г. по 1998г. представлены на рис.1. Далее была выполнена оценка спектра фрактальных размерностей для временного ряда среднемесячных расходов на участке р. Дунай от станции Девин (Братислава) до станции Нагимарос. Расчет показал, что соответствующие фрактальные размерности лежат в интервале [1.4-1.9]. Зная соответствующий мультифрактальный спектр, далее решается задача восстановления и прогноза среднемесячных расходов в любом интересующем интервале [18-20].

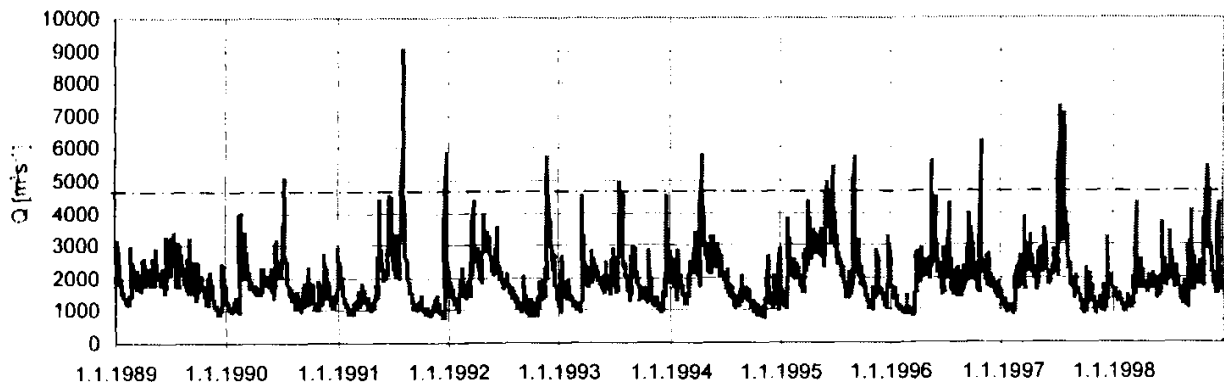


Рис. 1 – Среднемесячный расход воды на участке от станции Девин (Братислава) до станции Нагимарос р. Дунай в период с 1989г. по 1998г.

В табл. 1 приведены результаты численного моделирования характеристик экстремально высокого паводка (сценарий наводнения). Детальный анализ и сравнение результатов и возможностей нашего метода показывает, что примененная в работе системная модель позволяет отследить количественно приемлемо паводочные расходы в случае экстремальных событий. Разумеется, критичным моментом модели является ее правильная калибровка и настройка. Решение этого вопроса может привести к дальнейшему улучшению возможностей.

Таблица 1 – Рассчитанные расходы (в м³/с), соответствующие экстремальному паводку.

| Дата | Куново | Медведово | Комарно |
|------------|--------|-----------|---------|
| 4.8. 0:00 | 5136 | 3940 | 3556 |
| 4.8. 3:00 | 5475 | 4174 | 3657 |
| 4.8. 6:00 | 5713 | 4404 | 3778 |
| 4.8. 9:00 | 5929 | 4620 | 3905 |
| 4.8. 12:00 | 6039 | 4820 | 4050 |
| 4.8. 15:00 | 6182 | 5002 | 4195 |
| 4.8. 18:00 | 6304 | 5180 | 4340 |
| 4.8. 21:00 | 6395 | 5340 | 4485 |
| 5.8. 0:00 | 6474 | 5485 | 4628 |
| 5.8. 3:00 | 6618 | 5630 | 4770 |
| 5.8. 6:00 | 6715 | 5767 | 4905 |
| 5.8. 9:00 | 6793 | 5895 | 5040 |
| 5.8. 12:00 | 6810 | 6008 | 5171 |
| 5.8. 15:00 | 6800 | 6100 | 5294 |
| 5.8. 18:00 | 6747 | 6180 | 5410 |
| 5.8. 21:00 | 6680 | 6240 | 5517 |
| 6.8. 0:00 | 6550 | 6277 | 5615 |
| 6.8. 3:00 | 6502 | 6304 | 5707 |
| 6.8. 6:00 | 6408 | 6317 | 5780 |
| 6.8. 9:00 | 6256 | 6310 | 5845 |
| 6.8. 12:00 | 6070 | 6280 | 5898 |
| 6.8. 15:00 | 5936 | 6240 | 5940 |
| 6.8. 18:00 | 5802 | 6186 | 5971 |
| 6.8. 21:00 | 5670 | 6126 | 5990 |

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. Гонченко 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.
6. Найнал С., Иваненко А.Г. Стохастическая модель гидрографа рек Суринама // Метеорология, климатология и гидрология.-1993.-№29.-С.32-47.
7. Maftuoglu R.F. New models for non-linear catchment's analysis// Journal of Hydrology (Elsevier; The Netherlands).-1984.-Vol.73.-P.335-357.
8. Maftuoglu R.F. Monthly runoff generation by non-linear models// Journal of Hydrology (Elsevier; The Netherlands).-1991.-Vol.125.-P.277-291.
9. Kothyari U., Arvanmuthan V., Singh V. Monthly runoff generation using the linear perturbation model// Journal of Hydrology (Elsevier; The Netherlands).-1993.-Vol.144.-P.371-379.

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. 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.
12. 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 (Elsevier; The Netherlands). -2005.-Vol.77.-P.100-113.
13. 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.
14. Глушков А.В., Балан А.К. Застосування апарату вейвлет-перетворень та мультифрактального підходу до вивчення стохастичних флуктуацій річкового стоку (на пр.р.Дунай) // Метеорология, климатология, гидрология.-2005.-№49.-С.505-510.
15. 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// Вестник ОГЭКУ.-2008.-№6.-С.7-13.
16. Сербов Н.Г., Многофакторный системный и мультифрактальный подходы в моделировании среднемесячных расходов на примере р. Дунай// Український гідрометеорологічний журнал.-2010.-№5.-С.179-183.
17. 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. – No. 1-4. – P. 14-24.
18. 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// Вестник ОГЭКУ.-2007.-№4.-С.337-348.
19. Глушков А.В., Лобода Н.С., Хохлов В.Н., Сербов Н.Г., Свиначенко А.А., Бунякова Ю.Г. Хаос во временных рядах концентраций загрязняющих веществ в атмосфере: краткосрочный прогноз// Вестник ОГЭКУ.-2008.-№5.-С.225-235.
20. 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// Stoch. Environment Res. Risk Assess. (Springer).-2008.-Vol.22,№6.-P.777-788.

Багатофакторний системний та мультифрактальний підхід у моделюванні екстремально високих паводків на прикладі р. Дунай. Сербов М.Г., Сухарев Д.Є., Балан А.К.

На підставі нового методу опису характеристик гідрологічних систем, який базується на багатофакторному системному підході і мультифрактальному формалізмі, проведено моделювання характеристик екстремально високих паводків (на прикладі р. Дунай). Виконане дослідження флуктуаційних часових трендів змінення середньомісячних витрат (1989-1998гг.) і визначені значення відповідних фрактальних розмірностей.

Ключові слова: метод багатофакторного системного моделювання, екстремально високі паводки

A multi-factor systems and multi-fractal approach to modelling extremely high discharges on the example of the Danube river. Serbov N.G., Sukharev D.E., Balan A.K.

It is carried out modelling characteristics of extremely high discharges (r. Danube) and fluctuative temporal trends for mean monthly discharges within a new method of description for the hydrological systems. The latter is based on the combining multi-factor systems approach and multi-fractal formalism. It is calculated a spectrum of fractal dimensions.

Kew words: multi-factor systems approach, extremely high discharges