

**Н.Г. Сербов, к.г.н., А.В. Игнатенко, к.ф.-м.н., И.А. Шахман, к.г.н.,  
А.К. Балан, ст. преп., А.А. Дудинов, ас.**  
*Одесский государственный экологический университет*

## **МЕТОДЫ ТЕОРИИ ХАОСА В МОДЕЛИРОВАНИИ И ПРОГНОЗИРОВАНИИ ГОДОВОГО СТОКА (р. ДУНАЙ)**

*На основе метода теории хаоса проведено численное моделирование флуктуационных временных трендов изменения годового стока рек (на примере р. Дунай). Рассмотрена модель краткосрочного прогноза.*

**Ключевые слова:** *методы теории хаоса, годовой сток, прогноз*

В настоящее время по-прежнему крайне актуальной является разработка высоко эффективных, адекватно отражающих физику гидрологического цикла математических моделей для анализа и прогноза временной динамики фундаментальных характеристик гидрологических систем, в частности, рек. Разумеется, ключевые требования к подобным моделям связаны с обязательным наличием достаточно высокой степени корректности и прогнозируемости [1-5]. Напомним, что к числу классических подходов к моделированию характеристик речного стока следует, естественно, отнести 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 последние годы развитие получил ряд более простых в вычислительном отношении моделей типа «black-box» моделей [1-7], а также относительно новый класс моделей, основанных на использовании аппарата функций отклика [5-13]. Как частный случай искомого подхода, могут рассматриваться системные модели с «множеством входов» и «одним выходом». В числе таких моделей следует упомянуть так называемые модели типа Arime-Nonline [4], а также модели типа OSEU-Hydro-MSFR [6,7,13], базирующиеся на многофакторном системном и мультифрактальном формализмах. Ранее модель OSEU-Hydro-MSFR с успехом применена для решения задач описания гидрологических характеристик, в частности, при описании экстремальных гидрологических явлений [137]. Тестовые расчеты и сравнение теоретических данных с данными наблюдений по расходам, соответствующим экстремальным паводкам на примере р. Дунай, продемонстрировали достаточную эффективность модели OSEU-Hydro-MSFR и удовлетворительное согласие теории с данными наблюдений [4]. В отличие от классических или полуэмпирических моделей описания характеристик речного стока в указанных моделях более адекватно отражена физика гидрологического цикла. Между тем, для них также важной проблемой остается адекватная калибровка и более детальное изучение внутренних симметрий.

С другой стороны, последние годы широкое развитие получили новые для современной гидрологии методы теории хаоса и динамических систем, к которым следует отнести целый ряд подходов таких как метод стохастических пропагаторов, и функций памяти, мультифрактальный формализм, вейвлет-анализ, метод корреляционной размерности, теория показателей Ляпунова, метод ближайших ложных соседей, метод нелинейного прогноза и т.д. (см. детальнее [5-16]). На основе указанных методов удалось добиться достаточно хорошего описания и

прогнозирования фундаментальных характеристик как многих гидрологических, экологических, геофизических систем. В данной работе на основе методов теории хаоса проведен численный анализ (на примере р. Дунай) флуктуационных временных трендов изменения годового стока. Поскольку искомые методы достаточно детально излагались в многочисленных публикациях [5-16], мы перейдем к результатам

В данной статье представляются результаты численного анализа флуктуационных временных трендов изменения годового стока р. Дунай в период с 1901г. по 2011г. (рассматривался участок р. Дунай от станции Devin (Bratislava) до станции Achleiten; см. рис.1). Детальное описание искомого участка дано в работе [13], где также описано применение к задаче моделей OSEU-Hydro-MSFR и Arime-Nonline [4]. Тестовые расчеты продемонстрировали достаточно хорошее согласие выходных данных по значениям годового стока обеих моделей. На рис.1 представлены расчетные данные (сплошные кривые) по годовому стоку (в  $m^3/s$ ), соответствующие станциям: 1 - Bratislava (QBL), 2- Kienstock (KNS), 3- Achleiten (ACL), 4 – Nagymaros (NMR) [4].

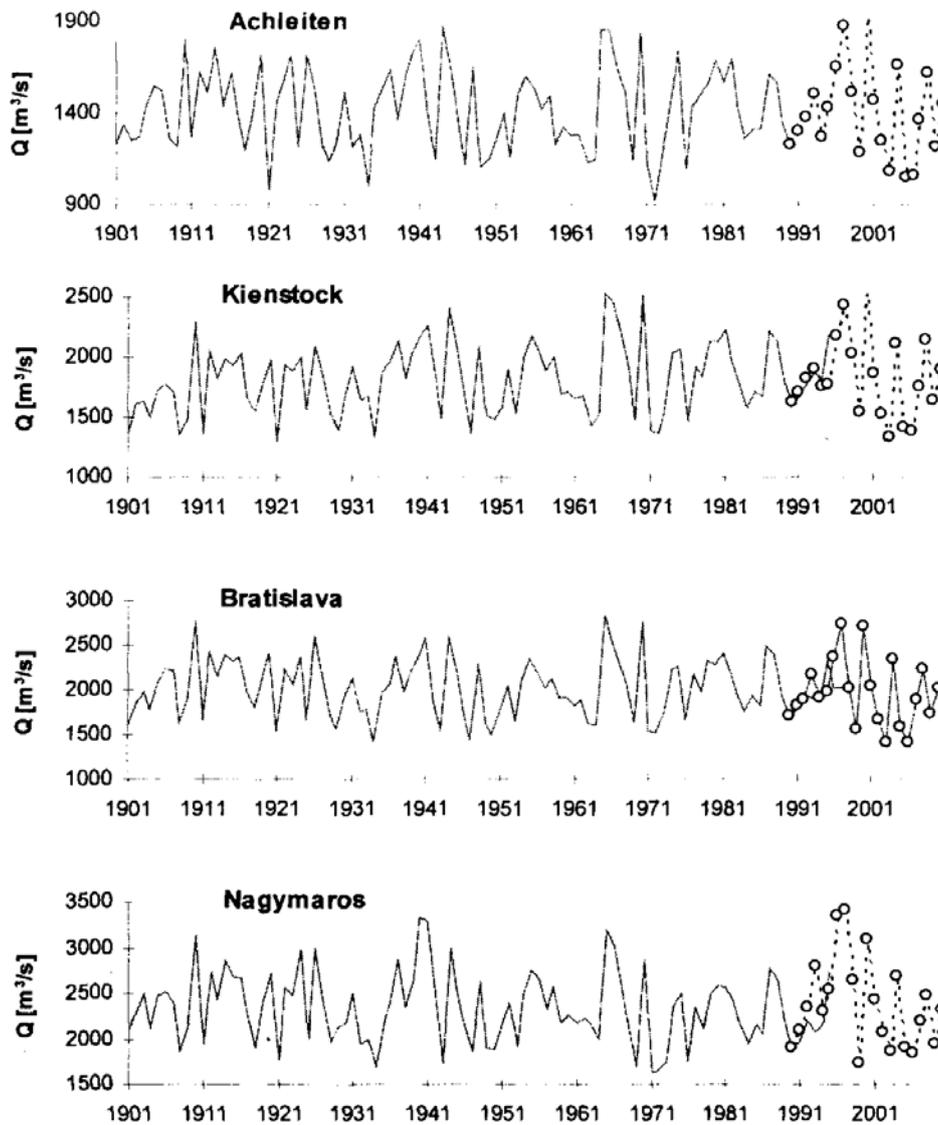


Рисунок 1 - Серии значений годового стока для 4 станций в р-не Братиславы (для р. Дунай) и прогнозные значения (кривые с кружками)

Анализ [13] показал, что модель OSEU-Hydro-MSFR предсказывает временные флуктуации годового стока в очень близком согласии (отличие не превышает 2-4 %) с данными модели Arime-Nonline [11]. При этом, в отличие от последней, она является строго ab initio моделью. Сравнение полученных расчетных данных с наблюдаемыми [4] показывает, модель OSEU-Hydro-MSFR обеспечивает достаточно хорошее согласие искомым данным и позволяет отследить количественно приемлемо изменения годового стока на достаточно длительном временном интервале. Приведенные выше временные ряды годового стока анализировались с помощью методов теории хаоса, в частности, метода корреляционной размерности, мультифрактального формализма, метода показателей Ляпунова и нелинейной модели прогноза [5-8,13]. В таблице 1 представлены конкретные численные данные по времени задержки lag ( $\tau$ ), корреляционным размерностям ( $d_2$ ), размерностям вложения ( $d_E$ ), Каплан-Йорка ( $d_L$ ), средним пределам предсказуемости ( $Pr_{max}$ ) и параметру  $K$  для рядов годового стока (р. Дунай; см. выше).

Таблица 1 - Время задержки lag ( $\tau$ ), корреляционная размерность ( $d_2$ ), размерность вложения ( $d_E$ ), размерность Каплан-Йорка ( $d_L$ ), средняя предел предсказуемости ( $Pr_{max}$ ) и параметр  $K$  для рядов годового стока (р. Дунай; см. текст)

Station	$\tau$	$d_2$	$d_E$	$d_L$	$Pr_{max}$	$K$
Achieiten	18	5,10	6	4,92	11	0,69
Kienstock	17	5,54	6	5,78	12	0,61
Bratislava	17	4,81	5	4,77	12	0,64
Nagymaros	15	5,06	6	5,65	13	0,78

Для использования метода нелинейного прогноза предварительно пришлось разрешить задачу определения оптимального числа ближайших соседних точек (NN) для того, чтобы результаты прогноза были удовлетворительными. Проведенные численные эксперименты показали, что с увеличением числа ближайших соседних точек качество прогностической кривой, как правило, возрастает. Проведенная нами оценка изменений годового стока (на период до 2011г включительно) также приведена на рис.1 (кривая с кружочками) и фактически совпадает с аналогичными данными, полученными в рамках эмпирических моделей Arime-Nonline, OSEU-Hydro-MSFR [11]. Полученные фрактальные размерности аттракторов говорят о том, что имеется уникальная возможность корректного решения задачи восстановления, прогноза как в кратко- так и в долгосрочном плане динамики колебаний фундаментальных гидрологических характеристик. Это особенно большое значение имеет для тех водосборов, где соответствующие данные очень скудны. Использование методов теории хаоса и нелинейного прогноза позволяет надежно предсказать и рассчитать динамику их эволюционных изменений.

#### 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. Kothyari U.C., Arvanmuthan V., Singh V.P. Monthly runoff generation using the linear perturbation model// J.Hydrol.-1993.-Vol.144.-P.371-379.
4. 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.

5. *Bunyakova Yu.Ya. and Glushkov A.V.* Analysis and forecasting effect of anthropogenic factors on air basin of industrial city.-Odessa: Ecology, 2010.-256p.
6. *Глушков А.В., Балан А.К., Баланюк Е.П.* Метод многофакторного системного и мультифрактального моделирования в задачах расчета экстремальных гидрологических явлений//Ecology of Siberia, Far East and the Arctic.-2003.-V.2.-P.113-118.
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. *Глушков А.В., Хохлов В.Н., Сербов Н.Г., Балан А.К., Буныкова Ю.Я., Баланюк Е.П.,* Низкоразмерный хаос во временных рядах концентраций загрязняющих веществ в атмосфере и гидросфере// Вісник ОДЕКУ.-2007.-N4.-С.337-348.
9. *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.
10. *Loboda N.S., Glushkov A.V., Khokhlov V.N.* Using meteorological data for reconstruction of the annual runoff series over ungauged area: Empirical orthogonal functions approach to Moldova-Southwest Ukraine region//Atmospheric Research.-2005.-Vol.77.-P.100-113.
11. *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.
12. *Khokhlov V.N., Glushkov A.V., 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,N6.-P.777-788.
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.-N6.-С.7-13.
14. *Сербов Н.Г., Сухарев Д.Е., Балан А.К.* Многофакторный системный и мультифрактальный подход к моделированию экстремально высоких паводков на примере р. Дунай // Український гідрометеор. журнал.-2010.-N7.-С.167-171.
15. *Glushkov A.V., Khetselius O.Yu., Bunyakova Yu.Ya., Grushevsky O.N., Solyanikova E.P.* Studying and forecasting the atmospheric and hydroecological systems dynamics by using chaos theory methods// Dynamical Systems Theory Eds. J. Awrejcewicz et al (Polland).- 2013.-Vol.T1.-P.249-258.
16. *Glushkov A.V., Khetselius O.Y., Brusentseva S.V., Zaichko P.A., Ternovsky V.B.* Studying interaction dynamics of chaotic systems within a non-linear prediction method// Advances in Neural Networks, Fuzzy Systems and Artificial Intelligence, Series: Recent Advances in Computer Engineering, Ed. J.Balicki.(Gdansk, WSEAS Pub.).-2014.-Vol.21.-P.69-75.

**Методи теорії хаосу у моделюванні річного стоку (р. Дунай).**

**Сербов М.Г., Ігнатенко Г.В., Шахман І.О., Балан А.К., Дудінов О.А.**

*На підставі методів теорії хаосу проведено чисельне дослідження флуктуаційних часових трендів зміння річного стоку (на прикладі р. Дунай). Розглянуто модель короткострокового прогнозу. .*

**Ключові слова:** методи теорії хаосу, річний стік, прогнозування

**Chaos theory methods in modelling the annual runoff (the Danube river).**

**Serbov N.G., Ignatenko A.K., Shakhman I.A., Balan A.K., Dudinov A.A.**

*It is carried out numerical modelling fluctuate temporal trends for annual runoff (r. Danube) on the basis of a chaos theory methods. It is considered a short-term forecast model. .*

**Key words:** chaos theory methods, multi-fractal, annual runoff, forecast