

УДК 556.048:519

Артеменко В.А., Петрович В.В., канд. техн. наук

## О ВЗАИМОСВЯЗИ ПАМЯТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ РЯДОВ И ПИКОВОГО ГОДОВОГО РАСХОДА ВОДЫ РАВНИННЫХ РЕК

**Аннотация.** Приведены результаты оценки долговременной и кратковременной памяти гидрологических временных рядов рек одного бассейна.

Отмечено снижение памяти ряда по мере увеличения годовых пиковых расходов воды.

Для методов прогнозирования расходов, учитывающих факторы наличия памяти ряда, рассмотрены некоторые причины снижения качества прогноза в периоды экстремальных гидрологических ситуаций.

**Ключевые слова:** методы оценки памяти временного ряда, долговременная и кратковременная память гидрологического ряда.

**Анотація:** Наведені результати оцінки довгострокової і короткочасної пам'яті гідрологічних часових рядів річок одного басейну.

Відзначено зниження пам'яті ряду зі збільшенням річних пікових витрат води.

Для методів прогнозування витрат, які враховують фактори наявності пам'яті ряду, розглянуті деякі причини зниження якості прогнозу в періоди екстремальних гідрологічних ситуацій.

**Ключові слова:** методи оцінки пам'яті часового ряду, довгострокова і короткочасна пам'ять гідрологічного ряду.

**Annotation.** In this article are brought results for rating long-term and short-term memories in hydrological time series of the rivers of one tributary basin.

Are noted the reduction of time series memory when increase the peak annual expenses of water.

For forecasting methods founded on memories presence in time series some reasons of the reduction of prediction quality at extreme periods of hydrological situation are considered.

**Keywords:** methods of rating memory for time-series, long – term and short – term memory in hydrological series.

### **Введение**

Традиционно в гидрологии процессы изменчивости речного стока рассматривались как результат воздействия многих факторов, что предопределило преимущественно стохастический подход к их изучению.

При этом в качестве рабочей гипотезы исследователи обычно выбирали теорию Гаусса.

Однако для анализа ситуаций, плохо аппроксимируемых нормальным распределением, требуются более совершенные инструменты исследования, позволяющие с новых позиций и более широко изучать природу гидрологических рядов [1, 2].

Одним из эффективных инструментов исследования временных гидрологических рядов является оценка их методом «нормированного размаха», предложенный в свое время британским гидрологом Г. Хёрстом как итог его изучения годовых стоков р. Нил.

Изучая статистику объемов стоков рек, он предложил новую статистическую методологию различия случайных и неслучайных процессов.

Исследования Г. Хёрста, а позже Е. Федера и Б. Мандельброта, различных природных рядов показали, что такие ряды обладают т.н. долговременной памятью.

Оценка и учет долговременной, а также кратковременной памяти гидрологических рядов позволило разрабатывать более совершенные прогнозные модели, в том числе модели опасных гидрологических явлений (экстремально высоких паводков, наводнений и пр.).

Дальнейшее исследование этих вопросов определило цель настоящей работы.

### **Исходные данные**

В процессе работы использовались данные для шести равнинных рек бассейна

р. Десна.

Данные представляли собой ряды среднесуточных расходов воды, м<sup>3</sup>/с.

Для упрощения анализа данных значения, соответствующие 29 февраля высокосных годов, не рассматривались. То есть любой год был представлен только 365 значениями соответствующих расходов.

Поскольку использовались данные, принадлежащие рекам с существенно различными расходами (см. таблицу), в дальнейшем можно говорить о некоторых обобщениях по результатам проводимых исследований.

**Таблица 1** - Средние многолетние расходы исследуемых рек

Порядковый номер реки	Период анализа, годы	Средний многолетний расход, м <sup>3</sup> /с
Река 1	1960...2009	5
Река 2	1960...2009	8
Река 3	1950...1989	23
Река 4	1960...2009	29
Река 5	1960...2009	94
Река 6	1900...2004	332

### Показатель (критерий) Хёрста

Для анализа гидрологических рядов используем метод «нормированного места для формулы размаха» Хёрста, который позволяет исключить влияние различных временных отрезков ряда за счет введения безразмерного отношения  $R/S$ :

$$\left(\frac{R}{S}\right)_N = (A * N)^H, \quad (1)$$

где  $R$  – размах отклонения величины  $X(R = \max X - \min X)$  ;

$S$  – стандартное отклонение исходных наблюдений;

$N$  – число наблюдений;

$A$  – произвольная положительная константа (в данном случае используется значение  $A=1$ );

$H$  – показатель Хёрста.

Хёрст предложил формулу для оценки величины  $H$  по значению  $R/S$ :

$$H = \frac{\log(R/S)}{\log(N+A)} \quad (2)$$

Формула (2), по сути, определяет методологию вычислений показателя Хёрста.

Авторами был разработан свой алгоритм расчёта показателя Хёрста, который был использован в дальнейшем при оценке величины  $H$ .

Как известно, основным достоинством критерия Хёрста является устойчивость его к априорному распределению временного ряда. То есть критерий будет одинаково хорошо работать вне зависимости от того, какому виду распределения будет подчиняться временный ряд.

Когда с помощью этого критерия анализируют временные ряды, обычно выделяют три различных интервала:

$$0 \leq H < 0,5$$

$$H=0,5;$$

$$0,5 < H \leq 1$$

Значение  $H=0,5$  указывает на случайный ряд. События случайны и не коррелированы между собой. Настоящее не влияет на будущее.

Диапазон значений  $0 \leq H < 0,5$  соответствует антиперсистентным (эргодическим) рядам.

Обычно если антиперсистентная система демонстрирует рост в предыдущий период, то, скорее всего, в следующем периоде будет отмечаться ее спад (и наоборот). При  $0,5 < H \leq 1$  имеем персистентные (трендоустойчивые) ряды.

Если персистентный ряд возрастает (убывает) в предыдущий период, то он будет сохранять эту тенденцию еще определённое время в будущем.

Для персистентных рядов любое наблюдение не является независимым, поскольку несёт определённую память обо всех предшествующих событиях.

С таких позиций в данный момент недавние события имеют большее влияние, чем события отдаленные, но остаточное влияние любых предыдущих событий всегда ощутимо.

## **Взаимосвязь пикового годового расхода воды и показателя Хёрста $H$**

Численные эксперименты проводились следующим образом.

Для каждого года выбирали максимальное (пиковое) значение расхода  $Q_{max}$ , без привязки к конкретному месяцу.

Далее для всех значений среднесуточных расходов данного года определялся показатель Хёрста  $H$ .

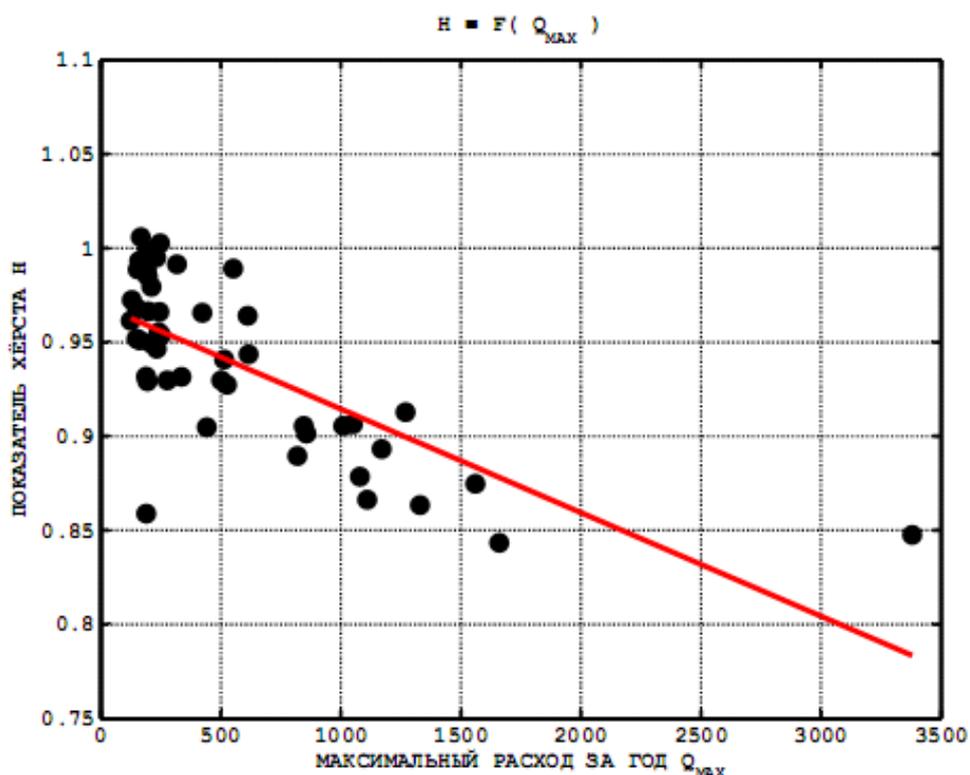
Таким образом, для одного года получали точку с координатами  $[Q_{max}; H]$ .

Затем каждая такая точка наносилась на график для соответствующей реки. Понятно, что для гидрологического ряда длиной, например, 50 лет, на график будет нанесено 50 точек.

С целью усиления информативности графиков через полученное собрание точек с помощью метода наименьших квадратов проводилась прямая линия.

Отметим, что в данном случае каждый годовой ряд расходов рассматривался как ряд уникальный, не связанный со свойствами ряда для другого года.

Как оказалось, по мере увеличения пикового годового расхода  $Q_{max}$  показатель Хёрста  $H$  уменьшается. Соответственно, прямые на графиках идут вниз (рис.1).



**Рисунок 1** - Взаимосвязь пикового годового расхода воды  $Q_{max}$  и показателя Хёрста  $H$  для реки 5

Если трактовать величину ежегодного показателя Хёрста  $H$  с позиции долговременной памяти, то такая память падает по мере возрастания величины пикового расхода для всех рек бассейна.

Другими словами, в годы максимальных (пиковых) расходов воды (имеется в виду величина самого пика) долговременная память заметно уменьшается по сравнению с годами, когда наблюдаются меньшие по величине значения пиковых расходов.

Численные эксперименты проводились с помощью мультиплатформенного программного обеспечения, которое работает без каких-либо модификаций в различных ОС (в данном случае в *WINDOWS* и *LINUX*).

### **Взаимосвязь кратковременной памяти гидрологического ряда и величины пикового годового расхода**

Рассмотрим еще один показатель, связанный непосредственно с памятью временных рядов. Для этого используем автокорреляционную функцию [3].

Определим временную задержку  $TAY$ , при которой имеет место «первый ноль» этой функции.

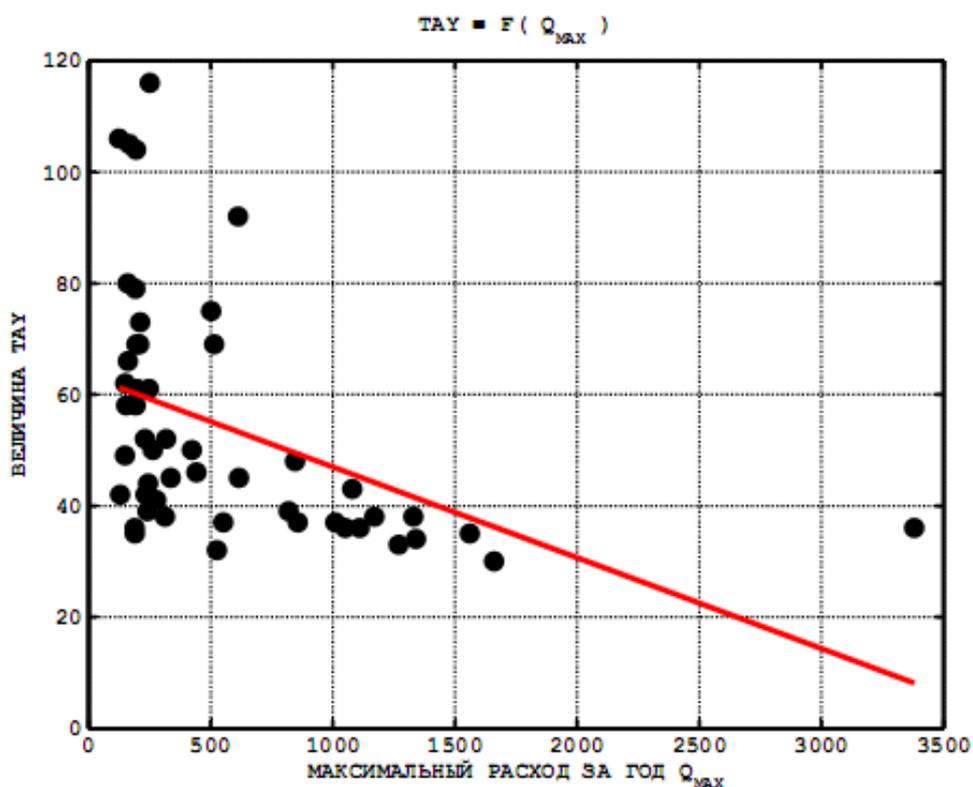
Разработанный алгоритм позволяет фиксировать время первого изменения знака автокорреляционной функции, т.е. переход от положительного значения к отрицательному ее значению.

Поскольку «первый ноль» означает, что полностью теряется корреляция между исходным рядом и сдвинутой по времени копией исходного ряда, это в некоторой степени может служить характеристикой памяти временного ряда.

При использовании «первого нуля» автокорреляционной функции глобальные свойства временного ряда, скорее всего, не рассматриваются. В этом случае следует говорить только о его кратковременной памяти.

Численные эксперименты проводились по аналогии с экспериментами, рассмотренными в предыдущем разделе. Однако теперь измерялось дискретное время  $TAY$ , выраженное в точках ряда, когда автокорреляционная функция достигала своего «первого нуля».

Один из результатов таких экспериментов представлен на рис. 2.



**Рисунок 2** - Взаимосвязь пикового годового расхода воды  $Q_{max}$  и величины дискретного времени  $TAU$  для реки 5

Как оказалось, характер поведения  $TAU$  при росте значений  $Q_{max}$  для всех шести рек качественно такой же, как и поведение  $H$ .

То есть, как кратковременная память гидрологических временных рядов (если считать, что она характеризуется величиной  $TAU$ ), так и долговременная память (если считать, что она характеризуется величиной  $H$ ) заметно уменьшаются по мере увеличения годовых пиковых расходов воды. Это в какой-то мере может свидетельствовать об универсальности обнаруженного нами явления.

### **Снижение качества прогнозирования для периодов пиковых расходов**

В настоящее время существует достаточно большое количество методов прогнозирования временных рядов, учитывающих наличие как кратковременной, так и долговременной памяти ряда.

Методы, использующие кратковременную память, обычно рассматривают только небольшую окрестность временного ряда (например, методы

авторегрессии). Разработан также целый ряд методов прогнозирования, для которых важна и долговременная память ряда. К таким методам следует отнести, например, методы локальной аппроксимации (*LA*-методы), основанные на поисках аналогов по всей длине временного ряда [4, 5].

Как известно, методы, основанные на поисках аналогов, в момент манипуляций с найденными аналогами (а это, собственно, непосредственный процесс прогнозирования) подразумевают, что близкие начальные условия в течение некоторого небольшого промежутка времени должны приводить и к близким результатам (если время прогноза невелико и правильно выбраны параметры прогнозирования). То есть это означает, что подобные процедуры прогнозирования используют свойства как долговременной, так и кратковременной памяти временного ряда.

Можно полагать, что долговременная и кратковременная память гидрологического ряда определенным образом связаны друг с другом: обычно уменьшение долговременной памяти приводит и к уменьшению кратковременной памяти (по крайней мере, это согласуется с практикой).

Для *LA*-методов необходимо наличие во временном ряду долговременных циклов, где должен обнаруживаться как минимум один аналог. Однако учитывая, что случаи, когда фиксируются максимальные значения пиковых расходов, встречаются достаточно редко, длина гидрологического ряда может оказываться недостаточной для нахождения аналогов требуемого качества.

Как показали проведенные исследования, результаты прогнозирования *LA*-методом нулевого порядка для участков максимальных значений пиковых расходов получаются заведомо хуже по сравнению с участками ряда, где анализируются меньшие по величине значения пиковых расходов (даже если имеется достаточное число найденных аналогов). То есть для максимально больших пиков качество найденных аналогов оказывается всегда ниже, чем при наличии меньших по величине пиков.

## Выводы

Для шести различных рек, относящихся к одному бассейну, были проанализированы величины годовых показателей Хёрста  $H$ , времени достижения «первого нуля» автокорреляционной функции  $TAU$  (выраженной в точках исследуемого ряда) и пиковых годовых расходов воды  $Q_{max}$ .

Обнаружена общность в поведении величины  $H$  и  $TAU$  в зависимости от величины  $Q_{max}$ , а именно тенденция заметного уменьшения этих величин при увеличении значений пиковых годовых расходов.

Рассмотрены некоторые возможные причины снижения качества прогнозирования методом локальной аппроксимации для периодов пиковых расходов.

### Литература

1. Найдёнов В.И. Нелинейная динамика поверхностных вод суши. – М.: Наука, 2004. – 318 с.
2. Коваленко В.В. Частично инфинитная гидрология. – СПб.: Изд-во РГГМУ, 2007. – 230 с.
3. Павлов А.Н. Методы анализа сложных сигналов. – Саратов: Научная книга, 2008. – 120с.
4. Артеменко В.А. Прогнозування нерегулярних часових рядів методом локальної аппроксимації/В.А. Артеменко, В.В. Петрович// Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – Вип. 86. –К.: Вид-во НТУ, 2012. –С.176-195.
5. Артеменко В.А. Повышение качества прогнозирования гидрологических временных рядов/В.А. Артеменко, В.В. Петрович// Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – Вип. 92. –К.: Вид-во НТУ, 2014. –С.146-127.

### Рецензенти

М.Т. Кузло, д-р техн. наук, НУВГП (Рівне)

А.В. Мішутін, д-р техн. наук, ОДАБА (Одеса)

### Reviewers

M.T. Kuzlo, Dr.Tech.Sci., NUWM (Rivne)

A.V. Mishutin, Dr.Tech.Sci., OSACEA (Odesa)