

ГИДРОЛОГИЯ

УДК 556.01

**А.П. Лепихин, Д.И. Перепелица
К ПРИМЕНЕНИЮ ПОКАЗАТЕЛЯ (КОЭФФИЦИЕНТА) ХЕРСТА В ГИДРОЛОГИИ***Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь*

Рассматриваются особенности применения коэффициента Херста в гидрологических исследованиях при анализе персистентности гидрологических и гидрохимических процессов. Созданный более 60 лет назад R/S – анализ, как инструмент решения сугубо гидрологических задач, получил в настоящее время очень широкое распространение при анализе динамических рядов различного генезиса. Он позволяет при минимуме исходных гипотез о характере рассматриваемого процесса оценивать такую важную для решения практических задач его характеристику, как персистентность – устойчивость в формируемых тенденциях.

Дан краткий анализ методов расчетов коэффициента Херста, оценки статистической значимости данных показателей при ограниченных размерах рассматриваемых выборок. На конкретных примерах рассматриваются вопросы применения коэффициента Херста для анализа основных гидрологических характеристик рек Западного Урала, метеорологических рядов и гидрохимических характеристик.

Значимость практического использования коэффициента Херста в настоящее время существенно возрастает в связи с выработкой (построением) критериев оценки его статистической значимости.

Ключевые слова: коэффициент Херста, основные гидрологические характеристики, гидрохимические показатели, метеорологические ряды, реки Западного Урала.

**A.P. Lepikhin, D.I. Perepelitsa
TO USE INDEX HURST IN HYDROLOGY***Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm*

Currently, there is a problem of determining the direction of hydrological and hydro-chemical processes. The article gives a brief analysis of the methods for calculating the Hurst exponent and statistical significance of the results. The article discusses use of the Hurst exponent for the analysis of the main hydrological characteristics of rivers in the Western Urals, meteorological and hydro-chemical characteristics of the series.

Key words: Hurst exponent, basic hydrological characteristics, hydro-chemical indicators, meteorological series, rivers of the Western Urals.

doi 10.17072/2079-7877-2016-4-36-44

В гидрологии, при решении конкретных задач обработки исходной информации, построения моделей рассматриваемых процессов, как правило, используются технологии и методические подходы, разработанные в различных разделах математики и гидродинамики (теория вероятностей и математическая статистика, теория размерности, численные методы решения задач гидродинамики). Однако Г. Херст [22;23] разработал инструментальный, первоначально предназначенный для решения чисто гидрологической задачи и получивший очень широкое применение в различных областях знаний. Предложенный Г. Херстом метод исследования случайных процессов и получивший название R/S-анализ позволил не только по-новому взглянуть на всю теорию случайных процессов, но и стал очень эффективным и популярным техническим подходом в исследовании процессов самой

различной природы: от телекоммуникаций, анализа биоэлектрических сигналов до решения задач регламентации качества воды [1–3; 8–10; 12; 13; 15; 17; 18; 20; 21].

Особенностью метода Г. Херста является то, что он требует минимальных исходных предположений о характере изучаемых процессов, однако не требует выполнения гипотезы стационарности и не чувствителен к характеру функций распределения исследуемых процессов. Принципиальное преимущество RS-анализа состоит в том, что он, по сравнению с корреляционным и спектральным анализами, не требует, чтобы рассматриваемая выборка представляла собой некоторую совокупность гармонических колебаний. Рассматриваемая технология ориентируется на анализ нелинейных колебаний, колебаний с изменением амплитуды и частоты. Нелинейные колебания значительно более характерны для естественных автоколебательных систем [9; 10; 12; 13].

В общем случае показатель Херста определяется следующим образом [14]. Вводится скользящее среднее приращений $X(n)$ на шаге n по выборке длиной k :

$$\bar{X}(n, k) = \frac{1}{k} \sum_{i=n-k+1}^n X(i), \quad (1)$$

где ряд приращений $X(n)$ вычисляется по исходному ряду $c(n)$ как $X(n) = c(n+1) - c(n)$ или как ряд логарифмических приростов $X(n) = \ln(c(n+1)/c(n))$.

Вычисляется размах накопленных отклонений от среднего для выборки длиной k :

$$R(n, k) = \max_{j \leq n} \left(\sum_{i=n-k+1}^j X(i) - \bar{X}(n, k) \right) - \min_{j \leq n} \left(\sum_{i=n-k+1}^j X(i) - \bar{X}(n, k) \right). \quad (2)$$

Вычисляется скользящая дисперсия рассматриваемого временного ряда по выборке длиной k :

$$S^2(n, k) = \frac{1}{k} \left(\sum_{i=n-k+1}^n X(i) - \bar{X}(n, k) \right)^2. \quad (3)$$

Ключевое значение в анализе Г. Херста занимает логарифмическое отношение размаха к среднему квадратическому отклонению рассматриваемого ряда:

$$\xi(N, k) = \ln \left(\frac{R(n, k)}{S(n, k)} \right). \quad (5)$$

Строится график зависимости $\xi(N, k)$ от $\ln(n)$. Наклон этого графика и определяет показатель Херста H .

При решении прикладных задач при относительно небольших объемах выборки, как правило, принимается $n=k=N$, где N – максимальная длина выборки.

Если при этом принять, что ряд стационарен, соответственно $\bar{X}(n, k) = const$, $S(n, k) \sim const$, в простейшем случае имеем $\frac{R}{S} \sim N^H$ или $H = \frac{\ln(R/S)}{\ln(N)}$.

По показателю Херста выделяются три различных типа поведения рассматриваемых систем:

– при показателе $H = 0,5$ события случайны и не коррелируемы. Настоящее не влияет на будущее. Процесс является полностью случайным и соответствует обычному белому гауссовскому шуму;

– при $0,5 \leq H \leq 1$ – временные ряды считаются персистентными и трендоустойчивыми, т. е. они сохраняют имеющуюся тенденцию, возрастание в прошлом более вероятно приводит к возрастанию в дальнейшем и наоборот. Персистентный ряд рассматривается как обобщенное броуновское движение или смещенное случайное блуждание, силы смещения зависят от того, насколько H больше 0,5;

– если $0 \leq H \leq 0,5$, то имеем антиперсистентную систему (любая тенденция стремится смениться на противоположную) и, соответственно, эргодические ряды. Характерной особенностью такой системы является «стремление возврата к среднему».

При этом сам коэффициент H непосредственно связан с автокорреляционной функцией $R(\tau) \sim |\tau^{2(H-1)}|$ $\tau \rightarrow \infty$. Современная теория данного параметра детально рассматривается в работе [17].

Как правило, показатель H трактуется как отношение силы тренда к уровню шума, при этом «сила» тренда к уровню шума оценивается в зависимости от того, на сколько величина H превосходит 0,5 [9; 10].

Интерес к R/S-анализу обусловлен тем, что, исследовав почти 690 различных рядов [1; 2], Херст установил, что параметр H существенно отклоняется от 0,5. В то же время, исходя из теории случайных процессов с независимым приращением, в том числе Марковских диффузионных процессов, следует, что $H \equiv 0,5$ [9; 10].

Как уже говорилось, в настоящее время инструментарий, разработанный гидрологом для решения гидрологических задач, стал одним из основных приемов исследования динамики различных процессов, в том числе и финансовых рынков. Вместе с тем сложилась весьма парадоксальная ситуация: в отечественной гидрологической литературе анализу и использованию данного коэффициента не уделяется должного внимания, хотя в работе [11] была отмечена значительная роль рассматриваемого показателя при анализе гидрологических процессов, в частности, многолетних колебаний стока. Этот парадокс связан, по-видимому, с рядом обстоятельств. Явление Херста не сопрягается с традиционными для отечественной гидрологии моделями стока в виде простых цепей Маркова [16]. В этом отношении весьма показательным предисловие к советскому изданию книги Г. Херста «Нил» [19], где редактор отмечает: «Вопросы приложения теории вероятностей, которые, как говорит автор, ему пришлось лично разрешать, **давно и гораздо более всесторонне разрешены в советских научных работах по гидрологии...**». Так же до последнего времени не было эффективных технологий оценки значимости коэффициента Херста при его расчете по выборкам ограниченной длины.

Действительно, тенденции к формированию группировок маловодных и многоводных лет достаточно давно были установлены в отечественной гидрологии, и их анализу посвящено большое количество исследований [5; 6 и др.]. Коэффициент (параметр) Херста позволяет количественно оценить эти тенденции, а структура группировок и их численная оценка будет иметь существенное практическое значение, в частности, в условиях наметившейся нестабильности климата. В связи с этим интерес к анализу данного коэффициента не ослабевает. Так, в последние годы решен вопрос оценки статистической значимости параметра H в условиях ограниченности рассматриваемых выборок [22].

В работе [22] на основе вычислительных экспериментов были оценены зависимости среднеквадратических отклонений σ_H от длины рассматриваемых рядов, а также были обсуждены законы распределения выборочных оценок \hat{H} . Было показано, что распределения выборочных оценок \hat{H} достаточно хорошо описываются нормальным распределением, при этом использовались четыре независимые схемы моделирования выборок N : R/S – анализ, $H_{R/S}$; дисперсия агрегированного ряда, H_d ; дискретный вейвлет-анализ, H_ω ; индекс фрактальности, H_{mu} .

Были рассчитаны среднеквадратические погрешности выборочных оценок показателя Херста. Результаты расчетов, выполненных в [22], представлены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость среднеквадратической погрешности оценки параметра H от длины рассматриваемой выборки по четырем независимым методам моделирования рядов N , по [22]

N	128	256	512	1024	2048
σ_{H_ω}	0,19	0,14	0,1	0,08	0,06
$\sigma_{H_{R/S}}$	0,13	0,1	0,08	0,06	0,06
$\sigma_{H_{mu}}$	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06
σ_{H_d}	0,09	0,07	0,06	0,06	0,04

Согласно [4] все рассматриваемые оценки, кроме оценки σ_{H_ω} , между собой хорошо связаны и имеют статистически значимые коэффициенты корреляции. Поэтому в дальнейшем анализе использовались медианные значения по трем хорошо согласующимся между собой оценкам:

$\sigma_{H_{R/S}}, \sigma_{H_{mm}}, \sigma_{H_d}$. Представленные результаты позволяют построить зависимость осредненных значений по всем четырем выборкам σ_H от объемов рассматриваемых выборок (рис. 1).

Как следует из рис. 1, в первом приближении зависимость $\sigma_H(N)$ достаточно хорошо аппроксимируется зависимостью

$$\sigma_H(N) \sim 1/\sqrt{N} \quad (6)$$

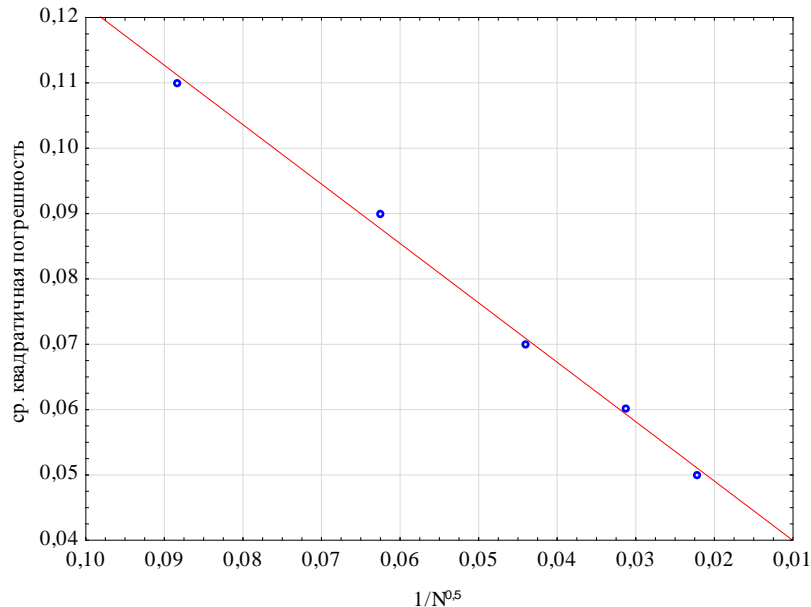


Рис. 1. Зависимость средней квадратической погрешности оценки параметра Херста от объема выборки N (медианные оценки по трем хорошо согласующимся между собой независимым вычислительным экспериментам, по [4])

Учитывая, как было установлено в [4], что распределение выборочных оценок подчиняется нормальному закону распределения, нетрудно, используя соотношение (6), построить доверительный интервал для параметра H , что значительно повышает объективность анализа данного коэффициента.

Как нетрудно видеть при

$$H \geq 0,5 + \frac{1,65}{\sqrt{N}} \quad (7)$$

можно с надежностью 95%, а при

$$H \geq 0,5 + \frac{1,96}{\sqrt{N}} \quad (8)$$

с надежностью 97,5% считать рассматриваемый ряд персистентным.

Соответственно, при $H \leq 0,5 - \frac{1,65}{\sqrt{N}}$ с надежностью 95%, а при $H \leq 0,5 - \frac{1,96}{\sqrt{N}}$ с надежностью

97,5% рассматриваемый ряд можно считать антиперсистентным.

В настоящей работе проведен расчет рассматриваемых коэффициентов Херста по достаточно длительным рядам, характеризующим различные гидрологические и гидрохимические процессы на территории Западного Урала.

Исходя из проведенного R/S-анализа основных гидрологических характеристик для рек Западного Урала были получены следующие показатели (табл. 2).

Как следует из соотношения (7), при объеме определяемой выборки $N \sim 100$ рассматриваемые ряды являются персистентными с надежностью 95% при $H \geq 0,7$.

Таблица 2

Показатель Херста для среднегодовых, максимальных расходов половодья и минимальных среднемесячных расходов зимней межени

№ п/п	Створ	H_{cp}	N_{cp}	$H_{макс}$	$N_{макс}$	$H_{мин}$ среднемесяч. зимний	$N_{мин}$
1	р. Кама – с. Бондюг	0,61	133	0,67	133	0,67	133
2	р. Кама – г. Пермь	0,59	133	0,59	107	0,72	132
3	р. Кондас – с. Ощепково	0,63	133	0,52	57	0,69	57
4	р. Вишера – п. Рябинино	0,63	133	0,61	133	0,66	133
5	р. Обва – с. Рождественское	0,68	133	0,52	133	0,74	133
6	р. Иньва – д. Слудка	0,63	133	0,61	133	0,70	133
7	р. Чусовая – Н. Шалыги	0,58	132	0,64	133	0,59	74
8	р. Чусовая – пгт. Лямино	0,58	130	0,68	133	0,68	131
9	р. Сылта – с. Подкаменное	0,63	132	0,60	133	0,74	132
10	р. Белая – г. Уфа	0,56	108	0,56	107	0,76	135
11	р. Вятка – г. Киров	0,68	108	0,55	107	0,75	133
12	р. Яйва – с. Усть-Игум	0,63	133	0,65	133	0,69	133

Примечание: H_{cp} , $H_{макс}$, $H_{мин}$ – показатель Херста; N_{cp} , $N_{макс}$, $N_{мин}$ – объем выборки (годы) для среднегодовых, максимальных и минимальных расходов.

Как следует из табл. 1, наибольшей тенденцией к персистентности характеризуются ряды минимальных месячных значений расходов воды, особенно в створах: р. Обва – с. Рождественское, р. Сылта – с. Подкаменное, р. Белая – г. Уфа, р. Вятка – г. Киров.

Данная оценка весьма важна и имеет существенное прикладное значение, так как минимальный месячный сток достаточно часто является лимитирующим параметром, существенно ограничивающим устойчивость водопользования. Высокая персистентность рассматриваемых рядов минимального месячного стока характеризует устойчивость наблюдаемых «тенденций». Данную оценку необходимо учитывать в построении схем устойчивого водопользования. В настоящее время имеется ряд публикаций, где отмечается, что климатические изменения проявляются, в первую очередь, в увеличении минимальных зимних расходов [7]. Отмеченный выше тезис (наибольшей персистентностью характеризуются минимальные месячные расходы воды) подтверждает характер внутригодового распределения рассматриваемого коэффициента H (рис. 2). Как видно из рис. 2, наибольшим значением H (наибольшей персистентностью) характеризуются как на р. Вятка, так и на р. Кама ряды зимних среднемесячных расходов воды, особенно наиболее низкие в годовом распределении отмечаются среднемесячные расходы воды за март.

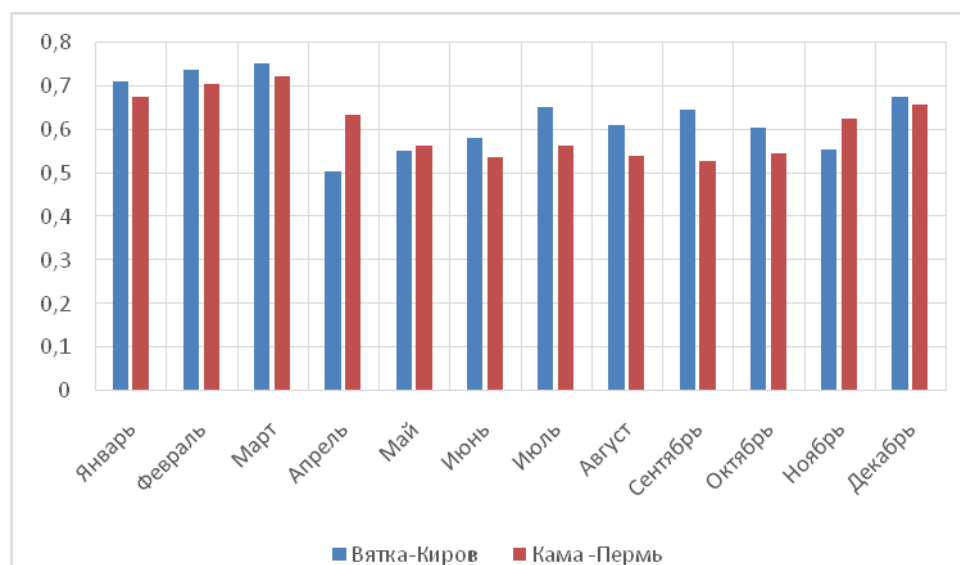


Рис. 2. Значение коэффициента Херста для среднемесячных расходов по постам

Для решения другой задачи – оценки значений коэффициента Херста в метеорологических рядах были использованы 3 метеостанции с наиболее длинными рядами наблюдений: Чердынь, Свердловск и Челябинск. Выполненные расчеты показали, что годовые суммы осадков только по метеостанции Чердынь характеризуются значимой персистентностью. Динамика годового хода осадков на других анализируемых метеостанциях может аппроксимироваться в виде диффузионного Гауссовского процесса. Динамика температуры воздуха за теплый и холодный периоды по данным метеостанциям не характеризуется значительной персистентностью.

Существенный интерес представляет попытка проанализировать значения коэффициента Херста для гидрохимических показателей с целью выявления трендов и оценки устойчивости этих трендов. Результаты расчетов представлены в табл. 3. Были выбраны расчетные створы, расположенные как выше зон активного техногенеза: р. Кама – пгт Гайны, р. Кама – пгт Тюлькино, р. Колва – г. Чердынь, р. Яйва – п. Яйва, так и в зонах активного техногенеза: р. Кама – г. Березники. Для расчетов использовались данные гидрохимических наблюдений с 1974 по 2008 г.

Как показали выполненные расчеты, представленные в табл. 3, нет принципиальной разницы в значениях H химических показателей качества воды для створов, расположенных как вне, так и в зонах активного техногенеза. Так, в створе р. Кама – г. Березники динамика таких ингредиентов, как хлориды, магний, азот аммоний, СПАВ, определяется процессами техногенеза. В других створах динамика этих и всех других показателей определяется, в значительной мере, естественными природными факторами. К сожалению, не удастся выявить различие характеристик коэффициента H в зависимости от генезиса рассматриваемых показателей качества воды.

Таблица 3

Показатель Херста по гидрохимическим показателям

№ n/n	Название	Кама– Гайны	Кама– Тюлькино	Кама– Березники	Колва– Чердынь	Яйва– Яйва
1	Расход	0,561	0,491	0,545	0,428	0,494
2	Температура	0,388	0,457	0,746	0,502	0,576
3	Взвешенные вещества	0,64	0,566	0,512	0,651	0,616
4	Магний	0,625	0,555	0,511	0,444	0,57
5	Хлориды	0,735	0,641	0,657	0,543	0,705
6	Сульфаты	0,608	0,604	0,592	0,447	0,612
7	Минерализация	0,643	0,579	0,649	0,45	0,688
8	Азот аммоний	0,549	0,617	0,625	0,572	0,639
9	Кремний	0,679	0,627	0,671	0,615	0,623
10	Фосфор	0,628	0,666	0,548	0,528	0,644
11	Железо	0,574	0,678	0,604	0,579	0,567
12	Медь	0,595	0,575	0,624	0,542	0,599
13	Цинк	0,525	0,633	0,583	0,561	0,677
14	Фенол	0,571	0,591	0,52	0,64	0,555
15	Нефтепродукты	0,547	0,677	0,595	0,626	0,513
16	СПАВ	0,546	0,63	0,591	0,547	0,615

Примечание: жирным шрифтом в табл. 3 выделены значения показателя Херста, характеризующиеся статистической значимостью более 95%

Выводы

Созданный более 60 лет назад R/S – анализ, как инструмент решения сугубо гидрологических задач, получил в настоящее время очень широкое распространение при анализе динамических рядов различного генезиса. Он позволяет при минимуме исходных гипотез о характере рассматриваемого процесса оценить такую важную для решения практических задач характеристику как персистентность – устойчивость в формируемых тенденциях. Значимость практического использования рассматриваемого коэффициента H в настоящее время существенно возрастает в связи с выработкой (построением) критериев оценки его статистической значимости. Проведенный анализ гидрологических рядов рек Камского бассейна показал, что наибольшей персистентностью характеризуются ряды минимального месячного стока.

Библиографический список

1. Антипов О.И., Нагорный М.Ю. Показатель Херста биоэлектрических сигналов // Инфокоммуникационные технологии. 2001. Т. 9. №1. С. 75–77.
2. Бутаков В., Граковский А. Оценка уровня стохастичности временных рядов произвольного происхождения при помощи показателя Херста // Computer Modeling and New Technologies. 2005. Vol. 9. №2. С. 27–32.
3. Калущ Ю.А., Логинов В.М. Показатель Херста и его скрытые свойства // Сибирский журнал индустриальной математики. 2002. Т. 5. №4. С. 29–37.
4. Кириченко Л.О. Сравнительный анализ статистических свойств оценок показателей Херста // Вісник НТУ «ХПІ» Тематический выпуск: Інформатика і моделювання. Харків, 2010. №21. С. 88–96.
5. Кузин П.С. Циклические колебания стока рек Северного полушария. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 178 с.
6. Лепихин А.П. Структура временной изменчивости стока рек бассейна р. Камы // Водное хозяйство России. Проблемы, технологии, управление. 2005. Т. 7. №3. С. 277–295.
7. Лобанова А.Г., Гуревич Е.В., Георгиевский Д.В., Грек Е.А., Молчанова Т.Г., Шалашина Т.Л. Особенности расчета основных гидрологических характеристик в условиях их временной нестационарности // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов. М., 2015. С. 313–315.
8. Любушин А.А. Фрактальный анализ рядов. М.: Из-во РГГУ, 2006. 22 с.
9. Мандельброт Б. Фракталы, случай и финансы (1957–1997) М.: Ижевск: R&C Dynamic, 2004. 255 с.
10. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Изд-во института компьютерных исследований, 2002. 656 с.
11. Найденов В.И. Нелинейная динамика поверхностных вод суши. М.: Наука, 2004. 317 с.
12. Перепелица В.А., Попов Е.В. Фрактальный анализ поведения природных временных рядов// Современные аспекты экономики 2002. №9(22). С. 185–208
13. Петерс Э. Фрактальный анализ финансовых рынков. Применение теории хаоса в инвестиции и экономику. М.: Интернет-трейдинг. 2006. 304 с.
14. Распределения показателя Херста нестационарного маркированного временного ряда / Д.С.Кириллов и др. // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2013. № 11. 16 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-11> (дата обращения: 01.03.2016).
15. Салль М.А. R/S – статистика атмосферного давления // Труды главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2012. № 566. С. 100–105.
16. Сванидзе Г.Г. Математическое моделирование гидрологических рядов. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 293 с.
17. Сухоруков И.П. Применение R/S анализа при оценке рисков инновационных компаний // Управление общественной и экономической системы. 2011. №1. С. 1–7.
18. Турбинский В.В. Гигиенические основы санитарной охраны трансграничных и пограничных источников питьевого водоснабжения населения Российской федерации: автореф. ... д-ра м. н. по специальности гигиена. М., 2012.
19. Херст Г. Нил. Общее описание реки и использование вод. М.: Иностранная литература, 1954. 326 с.
20. Шевнина Е.В. Анализ стационарности многолетних рядов слоя стока весеннего половодья на водосборах Российской Арктики // Проблема Арктики и Антарктики. 2011. №1(87). С.56–64.
21. Шулухин О.И. Причины самоподобия телетрафиков и методы оценки показателя Херста // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2007. Т. 3. №1. С. 5–13.
22. Hurst H. Long term storage capacity of reservoirs // Transactions of the American society of Civil Engineers. 1951. Vol. 116. P. 770–799.
23. Hurst H., Black R.P., Simairy Y. Long-term Storage // An Experimental Study. London Constable, 1965. 184 p.

References

1. Antipov, O. and Nagorny, M. (2001), “Hurst bioelectric signals”, *Infokommunikatsionnyye tekhnologii* [Information and Communication Technology], vol. 9, no. 1, pp.75–77.

2. Butakov, V. and Grakovskiy, A. (2005), "Estimation of stochastic time series of arbitrary origin by means of the Hurst exponent", *Komp'yuternoye modelirovaniye i novyye tekhnologii* [Computer Modeling and New Technologies], vol. 9, no. 2, pp. 27–32.
3. Kalush, Y. and Loginov, V. (2002), "Hurst Index and its hidden properties", *Sibirskiy zhurnal industrial'noy matematiki* [Siberian Journal of Industrial Mathematics], vol. 5, no. 4, pp. 29–37.
4. Kirichenko, L. (2010), "Comparative analysis of the statistical properties of the Hurst exponent estimations", *Visnik NTU «KHPI» Tematicheskyy vypusk: Informatika i modelirovaniye – Kharkiv NTU «KHPI»* [Vestnik NTU "KPI" Special Issue: Informatika I simulation – Harkiv NTU "KPI"], no.21, pp. 88–96.
5. Kuzin, P. (1970), "Tsiklicheskiye kolebaniya stoka rek Severnogo polushariya" [Cyclical fluctuations of river runoff in the northern hemisphere], Gidrometeoizdat, Leningrad, USSR.
6. Lepikhin, A. (2005), "The structure of the temporal variability of the Kama river basin runoff problems", *VODNOYE KHOZYAYSTVO ROSSII Problemy, tekhnologii, upravleniye* [Russian water services, technology, management]. Vol. 7, no. 3, pp. 277–295.
7. Lobanova, A., Gurevich, Ye., Georgiyevskiy, D., Grek Ye., Molchanova, G., and Shalashina, L. (2015), "Features of calculating the basic hydrological characteristics in terms of their temporal instability", *Fundamental'nyye problemy vody i vodnykh resursov: Trudy Chetvertoy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [Fundamental water problems and water resources: Proceedings of the fourth All-Russian scientific-practical conference with international participation,], pp. 313–315.
8. Lyubushin, A. (2006), "Fraktal'nyy analiz ryadov. Uchebnoye posobiye" [Fractal analysis ryadov. Uchebnoe allowance], Ros. Geologorazvedochnyy universitet publ., Moscow, Russia.
9. Mandel'brot, B. (2004), "Fraktaly, sluchay i finansy (1957-1997)" [Fractals, thematic and Finance (1957–1997)], R&C Dynamic, Moscow–Izhevsk, Russia.
10. Mandel'brot, B. (2002), *Fraktal'naya geometriya prirody* [Fractal Geometry of Nature], Institut komp'yuternykh issledovaniy Moscow, Russia.
11. Naydenov, V. (2004), "Nelineynaya dinamika poverkhnostnykh vod sushi" [Nonlinear dynamics surface waters], Nauka, Moscow, Russia.
12. Perepelitsa, V. and Popov, Ye. (2002), "Fractal analysis of the behavior of natural time series", *Sovremennyye aspekty ekonomiki* [Modern aspects of the economy], no.22, pp. 185–208
13. Peters, E. (2006), "Fraktal'nyy analiz finansovykh rynkov. Primeneniye teorii khaosa v investitsii i ekonomiku" [Fractal analysis of the financial markets. The application of chaos theory in the investment and the economy], Internet-treyding, Moscow, Russia.
14. Kirilov, D. (2013), "Distribution of non-stationary time series Hurst Markov" available at: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-11c> (accessed 01.03.2016).
15. Sall, M. (2012), "R / S – Statistics atmospheric pressure", *Trudy glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voyeykova* [Proceedings of MGO. Voeikov], no. 566, pp. 100–105.
16. Svanidze, G. (1977), "Matematicheskoye modelirovaniye gidrologicheskikh ryadov" [Mathematical modeling of hydrological series], Gidrometeoizdat, Leningrad, USSR.
17. Sukhorukov, I. (2011), "Application analysis of R / S in the evaluation of innovative companies", *Upravleniye obshchestvennoy i ekonomicheskoy sistemy* [Risk management of socio-economic system], no.1, pp. 1–7.
18. Turbinskiy, V. (2012), Hygienic bases of sanitary protection of cross-border and border sources of drinking water supply Russia, Abstract of Ph.d. diss., Medicine, Russian National Research Medical University. NI Pirogov, Moscow, Russia.
19. Kherst, G. (1954), "Obshcheye opisaniye reki i ispol'zovaniye vod" [General description of the river and the use of water], Izd. Inostrannoy literatury, Moscow, USSR.
20. Shevnina, Y. (2011), "Analysis of long-term series fixed bed of spring flood runoff in the catchment areas of the Russian Arctic", *Problema Arktiki i Antarktiki* [Arctic and Antarctic Issue], no. 87, pp.56–64.
21. Shulukhin, O. (2007), "Causes traffic body of self-similarity and evaluation methods Hurst", *Elektrotekhnicheskkiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy* [Electrical and information systems and systems], vol. 1, no. 3, pp. 5–13.
22. Hurst, H. (1951), *Long term storage capacity of reservoirs* // Transactions of the American society of Civil Engineers, vol. 116, pp.770–799.
23. Hurst, H., Black, R. and Simairy, Y. (1965), *Long-term Storage. An Experimental Study*, London Constable.

Поступила в редакцию 30.03.2016

Сведения об авторах**Лепихин Анатолий Павлович**

доктор географических наук, заведующий
Лабораторией проблем гидрологии суши ГИ
УрО РАН;
Россия, 614007, Пермь, ул. Сибирская, 78А;
e-mail: Lepihin49@mail.ru

Перепелица Дмитрий Ильич

инженер Лаборатории проблем гидрологии суши
ГИ УрО РАН;
Россия, 614007, Пермь, ул. Сибирская, 78А;
e-mail: perepelitsa_di@mail.ru

About the authors**Anatoliy P. Lepikhin**

Doctor of Geographical Sciences, Head of the
Laboratory of Surface Hydrology Mining Institute
of the Ural Branch of the Russian Academy of
Sciences;
78А, Sibirskaya str, Perm, 614007, Russia;
e-mail: Lepihin49@mail.ru

Dmitriy I. Perepelitsa

Engineer of the Laboratory of Surface Hydrology
Mining Institute of the Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences;
78А, Sibirskaya str, Perm, 614007, Russia;
e-mail: perepelitsa_di@mail.ru

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Лепихин А.П., Перепелица Д.И. К применению показателя (коэффициента) Херста в гидрологии // Географический вестник = Geographical bulletin. 2016. № 4 (39). С. 36–44. doi 10.17072/2079-7877-2016-4-36-44

Please cite this article in English as:

Lepikhin A.P., Perepelitsa D.I. To use index Hurst in hydrology // Geographical bulletin. 2016. № 4 (39). P. 36–44. doi 10.17072/2079-7877-2016-4-36-44

УДК 556.552

А.А.Шайдулина**ОСОБЕННОСТИ УРОВЕННОГО РЕЖИМА В РАЙОНЕ ПЕРЕМЕННОГО ПОДПОРА
КАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА****Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь*

Среди всего разнообразия аквальных геосистем наиболее неизученными с гидролого-геоморфологических позиций являются участки водохранилищ, находящиеся в районе переменного подпора. Это связано с тем, что формы проявления русловых деформаций в этом районе отличаются рядом особенностей, обусловленных внутригодовым характером регулирования уровня режима. В зависимости от колебания уровня происходит постоянное перемещение границы выклинивания подпора, что сказывается на гидравлическом режиме потока и режиме наносов. В статье рассмотрены существующие определения, применяемые для обозначения верхних участков равнинных водохранилищ, а также принципы их выделения. Показаны ключевые отличия морфометрических показателей верхнего участка Камского водохранилища и приведена их характеристика. Анализ уровня режима проведен по гидрологическим постам, расположенным в рассматриваемом районе Камского водохранилища. Уровень режим рассмотрен в соответствии с продолжительностью стояния уровней на проектных отметках. Отмечено влияние характера регулирования уровня режима водохранилищ на образование узлов скопления и расхода наносов на отдельных участках акватории. На основании особенностей уровня режима и показателей морфометрии приведено деление района переменного подпора Камского водохранилища на участки.