

## Анализ динамики уровня воды в Днестре, Припяти и реках Закарпатья

Бельков Д.В., Едемская Е.Н.

Донецкий национальный технический университет

belkov@telenet.dn.ua

*Бельков Д.В., Едемская Е.Н. «Анализ динамики уровня воды в Днестре, Припяти и реках Закарпатья». При исследовании фрактальности временных рядов используется показатель Харста Н. Он характеризует отношение силы тренда (детерминированный фактор) к уровню шума (случайный фактор). Учет фрактальности гидрографа позволит более точно предсказывать уровень воды в реке, что обеспечит получение заданных показателей качества обслуживания гидротехнических сооружений. Целью настоящей работы является исследование структуры гидрографа рек для выявления его характерных особенностей. В работе решаются следующие задачи: оцениваются плотности распределения, автоковариационные функции, энергетические спектры изучаемых временных рядов, определяется степень фрактальности (показатель Харста). Исследования выполнены в среде Matlab. Изучаемые временные ряды представляют собой измерения уровня воды в реках с помощью автоматизированных гидрологических станций. В первом случае (река Днестр) данные получены на контрольном створе в городе Могилев-Подольский, во втором (река Припять) – на створе Любязь. Третий ряд (река Уж) получен на контрольном створе Заречное, четвертый ряд (река Латорица) – на створе в городе Мукачево.*

**Ключевые слова:** динамика уровня воды, плотность распределения, автоковариационные функции, энергетические спектры, показатель Харста

### Введение

В задачу гидрологии входит систематическое изучение гидрологического режима водных объектов для получения временных рядов наблюдений за уровнями, скоростями течений, расходами и стоком воды.

Данные по гидрологическому режиму рек необходимы при организации работы водного транспорта, проектировании гидротехнических сооружений транспортного, энергетического, водозаборного назначения, планирования водопотребления, создания базы для научных исследований. В задачу инженерной гидрометрии входит наблюдение за режимом водных объектов при строительстве и эксплуатации различных инженерных сооружений, влияющих на естественный режим водоемов.

Для изучения гидрометеорологических явлений создана постоянная государственная сеть станций и створов. В состав основных гидрометеорологических работ на реках и водоемах входят наблюдения за уровнем воды и его колебаниями. Данные наблюдений со всех станций и створов сосредотачиваются в Гидрометеоцентре страны. Они обрабатываются, анализируются и служат для решения научно-теоретических и хозяйственных проблем, в частности для прогноза природных явлений, разработки водохозяйственных балансов региона и отдельных объектов, обеспечения

исходными данными при разработке проектов крупных гидротехнических сооружений.

Уровнем воды называется высотное положение поверхности воды в данной точке относительно условной горизонтальной неизменной по высоте плоскости. Наблюдения над уровнем ведут длительное время, поэтому условную плоскость помещают на метр ниже самого низкого возможного уровня, с тем, чтобы отсчеты были всегда положительными. Эта плоскость принимается за ноль отсчетов и называется нулем графика водомерного створа. Уровни воды в реках постоянно изменяются. Наблюдения за уровнями ведут ежедневно. Сроки измерения уровней зависят от режима реки и назначения створа. График хода уровня во времени называется гидрограф [1].

В середине прошлого века британский гидролог Харст показал, что уровень воды в реке может следовать фрактальному броуновскому движению (тренду с шумом). При исследовании фрактальности временных рядов используется показатель Харста Н. Он характеризует отношение силы тренда (детерминированный фактор) к уровню шума (случайный фактор).

Учет фрактальности гидрографа позволит более точно предсказывать уровень воды в реке, что обеспечит получение заданных показателей качества обслуживания гидротехнических сооружений [2].

Целью настоящей работы является исследование структуры гидрографа рек для выявления его характерных особенностей. В работе решаются следующие задачи: оцениваются плотности распределения, автоковариационные функции (АКФ), энергетические спектры изучаемых временных рядов, определяется степень фрактальности (показатель Харста). Исследования выполнены в среде Matlab.

### Анализ временных рядов

Изучаемые временные ряды представляют собой измерения уровня воды (см) в реках с помощью автоматизированных гидрологических станций [3]. Временные ряды показаны на рисунках 1 – 4. В первом случае (река Днестр) данные получены в городе Могилев-Подольский, во втором (река Припять) – на створе Любязь. Третий ряд (река Уж) получен на створе Заречное, четвертый ряд (река Латорица) – на створе в городе Мукачево.

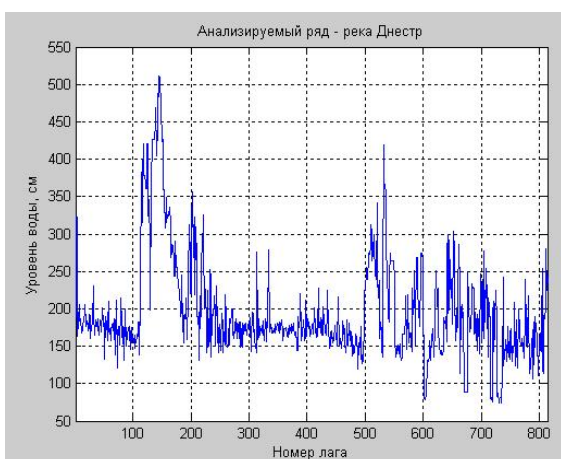


Рисунок 1. – Динамика уровня воды в Днестре

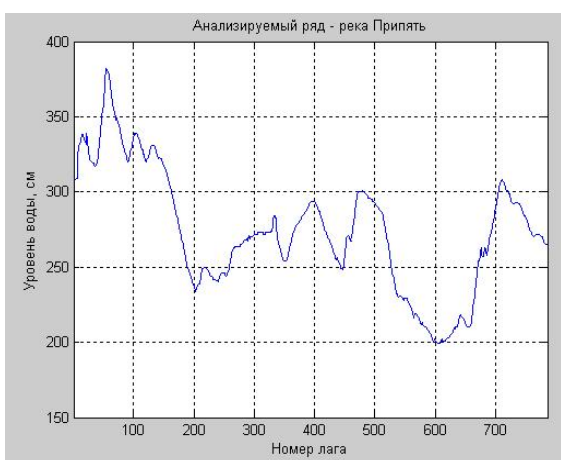


Рисунок 2. – Динамика уровня воды в Припяти

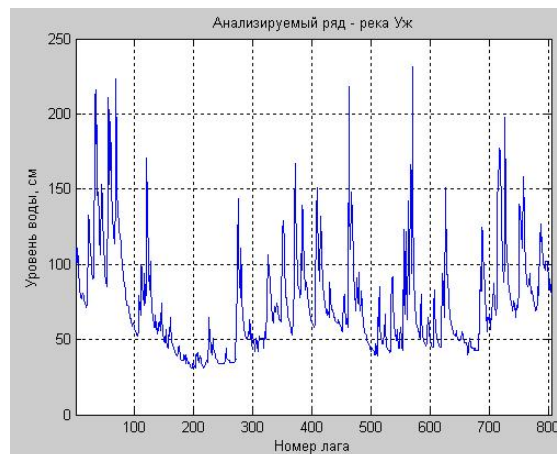


Рисунок 3. – Динамика уровня воды в реке Уж

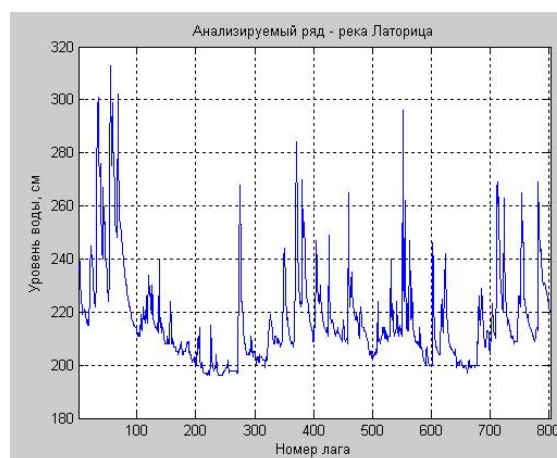


Рисунок 4. – Динамика уровня воды в реке Латорица

В первой серии экспериментов выполнен анализ плотностей распределения. Оценка проводилась на основании гистограмм относительных частот, показанных на рисунках 5 – 8. Визуальный анализ позволяет сделать следующий вывод: изучаемые временные ряды не подчиняются нормальному распределению.

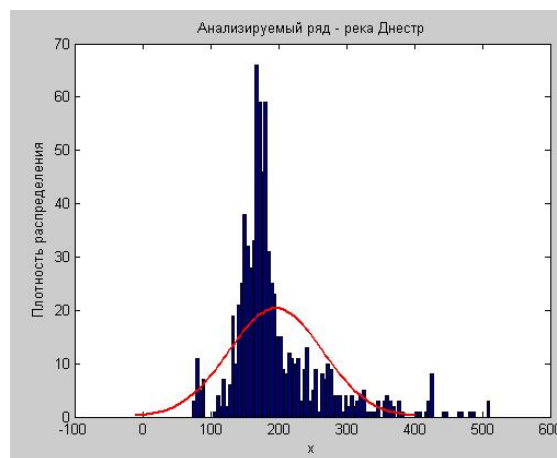


Рисунок 5. – Плотность распределения временного ряда для реки Днестр

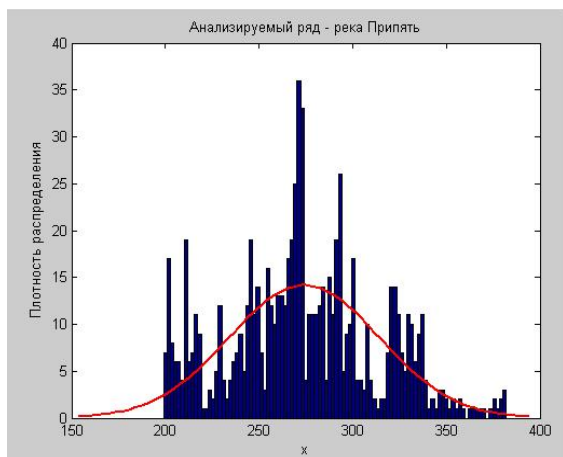


Рисунок 6. – Плотность распределения временного ряда для реки Припять

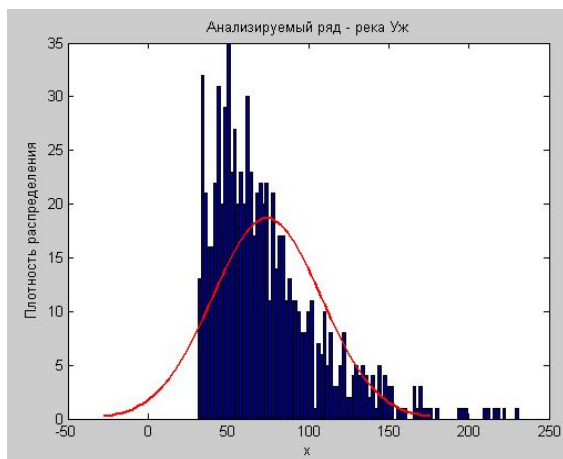


Рисунок 7. – Плотность распределения временного ряда для реки Уж

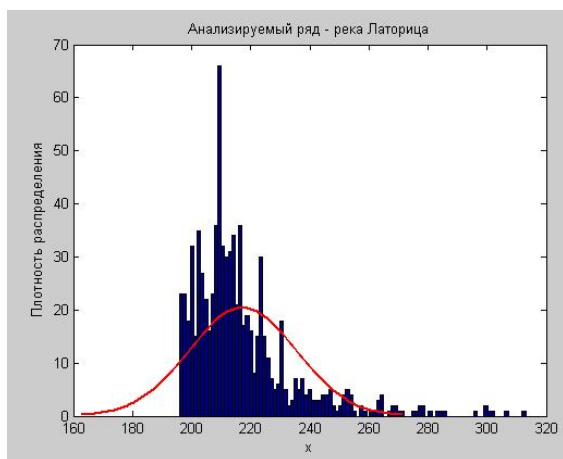


Рисунок 8. – Плотность распределения временного ряда для реки Латорица

Во второй серии экспериментов необходимо определить обладают ли временные ряды медленно убывающей зависимостью или

быстро убывающей зависимостью. Процесс  $X$  обладает медленно убывающей зависимостью (МУЗ) [long-range dependence], если для его автоковариационной функции (АКФ) выполняется условие  $r(k) \sim k^{-\beta}, k \rightarrow \infty$ . Процессы с МУЗ характеризуются автоковариационной функцией, которая убывает по степенному закону при увеличении временной задержки (лага). В отличие от процессов с МУЗ, процессы с быстро убывающей зависимостью (БУЗ) [short-range dependence] обладают экспоненциально спадающей АКФ вида  $r(k) \sim e^{-k}, k \rightarrow \infty$ . АКФ изучаемых временных рядов приведены на рисунках 9 – 12. Они не обращаются в ноль при больших значениях  $k$ , что говорит о медленном убывании АКФ и присутствии МУЗ во всех исследуемых реализациях трафика.

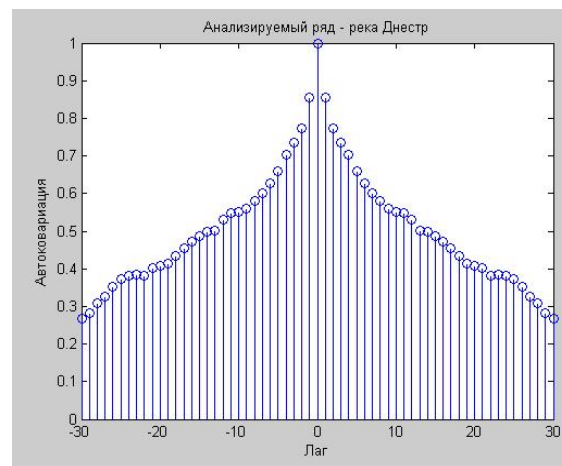


Рисунок 9. – АКФ временного ряда для реки Днестр

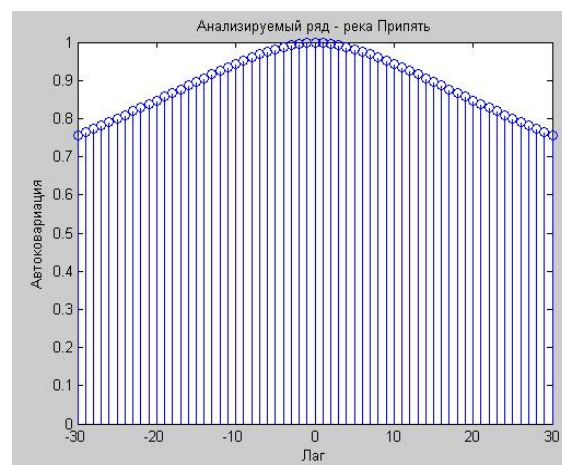


Рисунок 10. – АКФ временного ряда для реки Припять

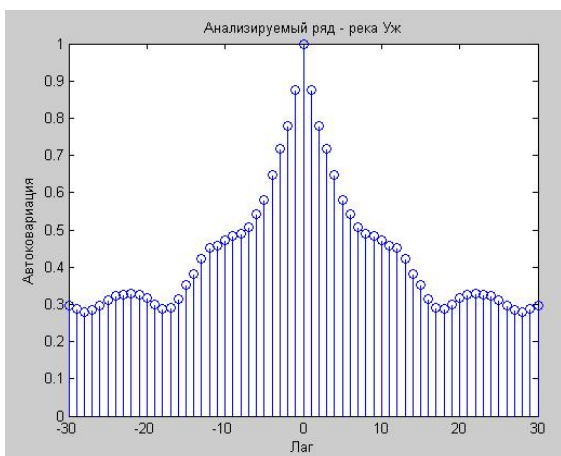


Рисунок 11. – АКФ временного ряда для реки Уж

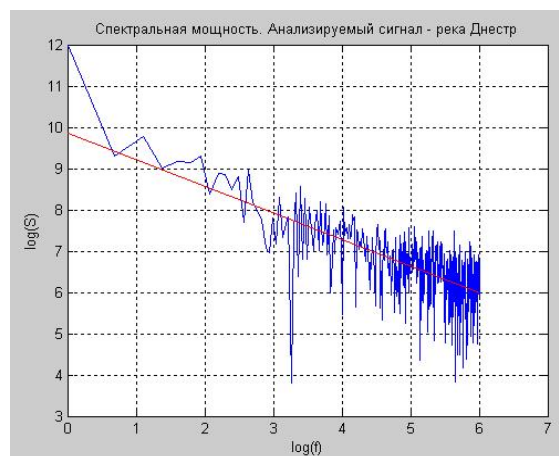


Рисунок 13. – Спектральная плотность временного ряда для реки Днестр

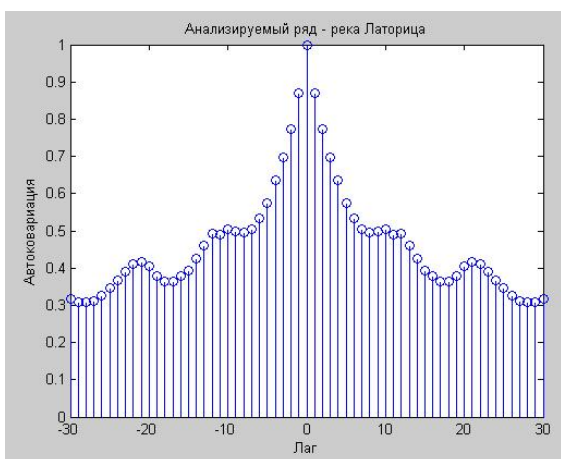


Рисунок 12. – АКФ временного ряда для реки Латорица

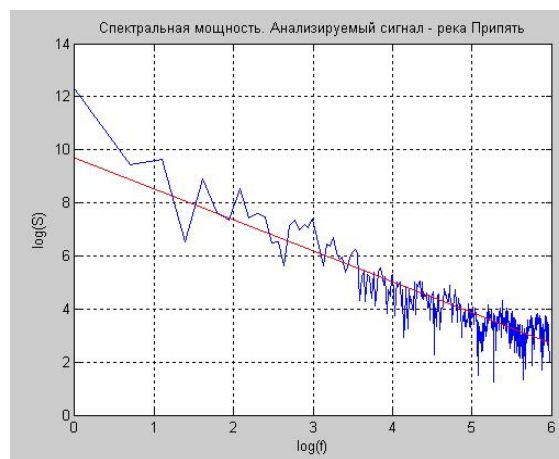


Рисунок 14. – Спектральная плотность временного ряда для реки Припять

В третьей серии экспериментов выполнен расчет энергетических спектров исследуемых временных рядов. Временной ряд с медленно убывающей зависимостью обладает степенным законом поведения спектральной плотности. Процесс  $X$  имеет МУЗ, если для спектральной плотности  $S(f) = \sum_k r(k) \cdot e^{ikf}$  выполняется условие  $S(f) \sim f^{-b}$ , где  $f \rightarrow 0$ ,  $i = \sqrt{-1}$ ,  $0 < b < 4$ .

Процесс с МУЗ обладает спектральной плотностью с особенностью в нуле: спектральная плотность стремится к бесконечности по мере того, как частота  $f$  стремится к нулю. Энергетические спектры реализаций представлены на рисунках 13 – 16.

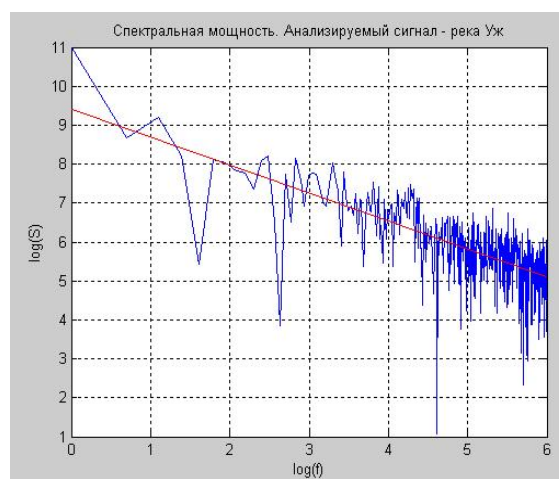


Рисунок 15. – Спектральная плотность временного ряда для реки Уж



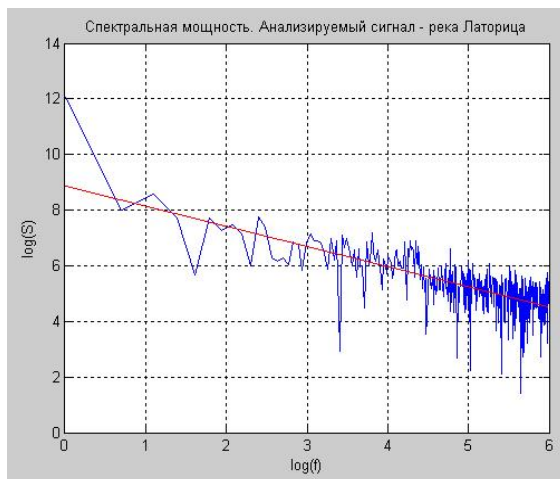


Рисунок 16. – Спектральная плотность временного ряда для реки Латорица

### Исследование показателя Харста

Если считать, что уровни воды в различные моменты времени  $t$  являются последовательностью случайных независимых величин, то суммарный уровень должен быть пропорционален величине  $t^H$ , где  $H = 0,5$ . Британский гидролог Г. Харст показал, что для некоторых рек такая гипотеза неверна. Уровни воды зависимы во времени. Показатель Харста  $H$  является мерой длительности долгосрочной зависимости процесса. Значение  $H = 0,5$  указывает на отсутствие долгосрочной зависимости. Корреляция между событиями отсутствует. Ряд является случайным, а не фрактальным. Чем ближе значение  $H$  к 1, тем выше степень устойчивости долгосрочной зависимости.

При  $0 \leq H < 0,5$  временной ряд является трендонеустойчивым (антиперсистентным). Он более изменчив, чем случайный ряд, поскольку состоит из частых реверсов спад-подъем. Высокие значения процесса следуют за низкими, и наоборот. Вероятность того, что на  $i+1$  шаге процесс отклоняется от среднего в противоположном направлении (по отношению к отклонению на  $i$ -ом шаге) настолько велика, насколько параметр  $H$  близок к 0.

При  $0,5 < H \leq 1$  ряд трендоустойчив. Тенденция его изменения может быть спрогнозирована потому, что процесс обладает длительной памятью. Если в течение некоторого времени в прошлом наблюдались положительные приращения процесса, т.е. происходило увеличение, то и впредь в среднем будет происходить увеличение. Вероятность того, что процесс на  $i+1$  шаге отклоняется от среднего в том же направлении, что и на  $i$ -ом шаге настолько велика, насколько параметр  $H$

близок к 1. Персистентные стохастические процессы обнаруживают четко выраженные тенденции изменения при относительно малом «шуме».

В данной работе показатель Харста определяется с помощью процедуры [4]: для фрактальных процессов с увеличением частоты значение спектральной плотности падает по степенному закону с показателем  $b$ , причем  $b = 2H - 1$ . По этой формуле, зная величину  $b$ , можно найти показатель Харста  $H$ . Полученные значения  $H$ , показаны в таблице 1.

Таблица 1. – Показатели Харста

Временной ряд	Показатель Харста
Днестр	0,8218
Припять	0,8941
Уж	0,8598
Латорица	0,8609

Поскольку выполняется условие  $0,5 < H < 1$ , изучаемые ряды являются трендоустойчивыми (персистентными) и обладают долговременной памятью.

Причиной персистентности временных рядов, как указано в работе [2], может быть медленный спад воды после наводнений. Существенную роль играет задержка воды в почвах, грунтах, подземных водоносных горизонтах.

### Выводы

Для гидрологических режимов многих рек характерно, обнаруженное на практике, свойство фрактальности. В связи с этой особенностью динамики уровня воды актуальной является разработка конструктивных методов исследования речных гидрографов.

В данной работе для временных рядов уровня воды в Днестре, Припяти и рек Закарпатья [3] выполнен анализ плотности распределения, автоковариационных функций и энергетических спектров. Найдены значения показателя Харста  $H$ . Получены следующие результаты:

- изучаемые временные ряды не подчиняются нормальному распределению;
- изучаемые временные ряды не обладают экспоненциально спадающей АКФ, свойственной случайным рядам;
- изучаемые временные ряды являются персистентными и обладают долговременной памятью.

Перспективным направлением дальнейших исследований может быть анализ динамики уровня воды рек методами нелинейной динамики.

### Список литературы

1. Мазуркин П.М., Зверев В.И., Толстухин А.И. Статистическая гидрология. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2002. – 274 с.
2. Найденев В.И., Кожевникова И.А. Эффект Харста в геофизике // Природа, 2000, № 1. – С. 3 – 11. – Электр. ресурс. URL: <http://314159.ru/najdenov/najdenov1.pdf> (13.07.14).
3. Український гідрометеорологічний центр. – Электр. ресурс. URL: <http://hydro.meteo.gov.ua/> (28.07.14)
4. Compute the Hurst parameter for a sequence using the power spectral density method. – Электр. ресурс. URL: [http://www.cs.northwestern.edu/~pdinda/predclass/tools/hurst/hurst\\_psd.m](http://www.cs.northwestern.edu/~pdinda/predclass/tools/hurst/hurst_psd.m) (12.02.14).

### References (transliteration)

1. Mazurkin P.M., Zverev V.I., Tolstukhin A.I. Statisticheskaja gidrologija [Statistical hydrology]. Yoshkar-Ola: MarGTU, 2002. – 274 p.
2. Najdenov V.I., Kozhevnikova I.A. Effekt Harsta v geofizike [Hurst effect in geophysics] // Nature, 2000, no 1. – pp. 3 – 11. – Electr. resurs. URL: <http://314159.ru/najdenov/najdenov1.pdf> (13.07.14).
3. Ukraine gidrometeorologic center [Ukrainyky gidrometeorologichny Center]. – Electr. resurs. URL: <http://hydro.meteo.gov.ua/> (28.07.14).
4. Compute the Hurst parameter for a sequence using the power spectral density method. – Electr. resurs. URL: [http://www.cs.northwestern.edu/~pdinda/predclass/tools/hurst/hurst\\_psd.m](http://www.cs.northwestern.edu/~pdinda/predclass/tools/hurst/hurst_psd.m) (12.02.14).

**Бельков Д.В., Едемська Є.М. “Аналіз динаміки рівня води у Дністрі, Прип’яті та річках Закарпаття”.** При дослідженні фрактальності часових рядів використовується показник Харста  $H$ . Він характеризує відношення сили тренду (детермінований фактор) до рівня шуму (випадковий фактор). Урахування фрактальності гідрографу дозволить точніше передбачати рівень води у річці, що забезпечить отримання потрібних показників якості обслуговування гідротехнічних споруд. Метою даної праці є дослідження структури гідрографу річок для з’ясування їхніх характерних особливостей. У роботі вирішуються наступні задачі: оцінюються щільності розподілу, автоковаріаційні функції (АКФ), енергетичні спектри часових рядів, визначається ступінь фрактальності (показник Харста). Дослідження виконано у середовищі Matlab. Часові ряди, що досліджуються, уявляють собою виміри рівня води у річках за допомогою автоматизованих гідрологічних станцій. У першому випадку (річка Дністер) дані отримано на контрольному створі в місті Могилів-Подільський, у другому (річка Прип’ять) – на створі Любязь. Третій ряд (річка Уж) отриманий на контрольному створі Зарічне, четвертий ряд (річка Латориця) – на створі в місті Мукачеве.

**Ключові слова:** динаміка рівня води, щільність розподілу, автоковаріаційні функції, енергетичні спектри, показник Харста.

**Belkov D.V., Edemskaya E.N. “Analysis of dynamics of water level in Dnestr, Prypyat and rivers of Carpathians region”.** In practice the property of fractal for hydrograph of many rivers is discovered. In connection with this feature of dynamics of water level the development of research methods for the structure of river hydrograph is actual.

For fractal research of time series Hurst parameter  $H$  is used. It characterizes attitude of force of trend (determined factor) toward the level of noise (stochastically factor). The account of fractal of hydrograph will allow more exactly predicting a water level in a river, that will provide the receipt of the set indexes of quality of maintenance of hydrotechnical buildings. Research of structure of hydrograph of rivers for the exposure of it characteristic features is the purpose of this work. The following tasks decide in work: the closeness’s of distributing, autocovariance functions, power spectrums of the studied time series, fractal degree (Hurst parameter). Researches are executed in the Matlab environment. The studied time series are measuring of water level in rivers by the automated hydrological stations. In first case (river Dnestr) information is got in the Mogylev-Podol'skyu town, in the second case (the Prypyat river) – on the Lyubyaz post. The third case (river Uge) is got on a post Zarechnoy, fourth case (the Latorytsa river) – on a post in the Mukachevo town.

The following results are got:

- 1) the studied time series do not submit to normal distribution;
- 2) the studied time series do not possess exponentially falling ACF, incident to the stochastic time series;
- 3) the studied time series are persistent and possess of long duration memory.

The analysis of dynamics of water level of rivers can be perspective direction of further researches by the methods of nonlinear dynamics.

**Keywords:** dynamics of water level, closeness’s of distributing, autocovariance functions, power spectrums, Hurst parameter

Статья поступила в редакцию 04.09.2014  
Рекомендована к публикации канд. техн. наук Звягинцевой А.В.