

ТРАНСПОРТНІ СПОРУДИ

УДК 556.16:519.6

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

МЕТОД АНАЛИЗА СИНХРОННОСТИ КОЛЕБАНИЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА РЕК

Анотація. В роботі розглянутий сучасний метод вейвлет-анализу природних рядів – WAVELET-BASED SEMBLANCE ANALYSIS. Метод дозволяє отримувати числові характеристики миттєвого ступеня узгоджуваності для двох часових рядів (міру миттєвої кросс-кореляції рядів). Можливості методу проілюстровані на прикладі оцінки синхронності коливань гідрологічного режиму річок-аналогів.

Ключові слова: природний часовий ряд, вейвлет-анализ подоби рядів, миттєвий ступінь синхронності коливань гідрологічного режиму річок.

Аннотация. В работе рассмотрен современный метод вейвлет-анализа природных рядов – WAVELET-BASED SEMBLANCE ANALYSIS. Метод позволяет получать числовые характеристики мгновенной степени согласованности для двух временных рядов (меру мгновенной кросс-корреляции рядов). Возможности метода проиллюстрированы на примере оценки синхронности колебаний гидрологического режима рек-аналогов.

Ключевые слова: природный временной ряд, вейвлет-анализ подобия рядов, мгновенная степнь синхронности колебаний гидрологического режима рек.

Annotation. New method of the analysis of natural time series is considered in this article: it is a – WAVELET-BASED SEMBLANCE ANALYSIS. This method allows to get the measure instant cross – correlation for two time series. The possibilities of the method are demonstrated on example of hydrological time series.

Key words: natural time series, semblance wavelet analysis of time series, instfnt degree to simultaneity of hydrological time series.

Общие положения

Исследование закономерностей колебаний речного стока во времени и пространстве представляет собой важную задачу, решение которой во многом способствует совершенствованию практики гидрологических расчетов [1, 2].

При недостаточности данных наблюдений для оценки расчетных гидрологических характеристик, районировании территории по синхронности колебаний стока рек, восстановлении сверхбольших пропусков в гидрологических рядах и других задачах могут использоваться данные по рекам – аналогам [3-5], что требует совместного учета соответствующих временных рядов.

При этом обычно подразумевается, что сравнение таких рядов проводится на всем рассматриваемом временном интервале при одинаковой их дискретизации и предобработке.

Однако очевидно, что поведение анализируемых рек даже при достаточной согласованности может содержать существенные элементы индивидуальности. Так, реки с небольшими расходами проявляют значительную чувствительность к атмосферным осадкам [6].

Если в дальнейшем в течении длительного промежутка времени на водосборе одной из рек будут иметь место повышенные осадки, в результате можно получить рассогласование в поведении расходов сравниваемых рек.

В этой связи для решения задачи совместного учета колебаний расходов или уровней рек авторами ранее был предложен метод, позволяющий измерять коэффициент линейной корреляции во временном окне, одновременно применяемым для двух гидрологических рядов.

Такой оконный линейный коэффициент корреляции программно реализуется легко, экономичен к памяти, способен обрабатывать ряды большой длины даже на персональных ЭВМ.

Однако, как показала наша практика, метод имеет и определенные недостатки.

Для адекватной работы этого метода требуется достаточная ширина временного окна (окно должно захватывать несколько десятков или даже сотен измеренных значений).

В нашем случае такой метод анализа не позволит в полной мере получать локализованные по времени значения корреляции между двумя соответствующими рядами.

Как известно, для обработки, анализа и прогнозирования различных природных временных рядов широко используется Фурье-анализ [7, 8].

Поскольку временные природные ряды имеют сложную структуру, Фурье-спектр таких рядов обычно представляет собой трудно интерпретируемую смесь различных гармоник (монохроматических волн). То есть Фурье-анализ применяется прежде всего для исследований глобальных особенностей временных рядов.

Широко используемое в настоящее время вейвлет-преобразование наиболее приспособлено именно для анализа временных рядов, содержащих мультимасштабные нестационарности по различным частотам и позволяет исследовать переходные явления и сингулярности, фильтровать и сжимать сигналы [9, 10].

В этой связи вейвлет-преобразование наиболее подходит для анализа фрактальных временных рядов.

Вейвлет-анализ является эффективным инструментом для оценки локальных особенностей природных временных рядов. Исследуемый сигнал при этом рассматривается во временно-частотной области, что позволяет оценить изменение мод сигнала во времени.

В работе [11] была сделана попытка применить методы вейвлетанализа для решения некоторых гидравлических задач.

На вейвлетном анализе также основывается относительно новый метод нахождения подобия двух сигналов – WAVELET-BASED SEMBLANCE ANALYSIS.

В статье рассматриваются основы данного метода, позволяющие получать числовые характеристики мгновенной степени согласованности для двух различных рядов (меру мгновенной кросс-корреляции рядов).

Основа метода WAVELET-BASED SEMBLANCE ANALYSIS.

Далее рассмотрим наиболее удачную реализацию данного метода.

В этом случае схожесть/подобие (semblance) есть косинус разницы между фазовыми углами двух временных рядов на каждой частоте F (фазовые углы следует понимать в смысле Фурье-фазовых углов).

При этом схожесть S может принимать значения из диапазона $-1...+1$. Значение $+1$ подразумевает полную корреляцию фаз, значение "ноль" – отсутствие какой-либо фазовой корреляции, значение -1 есть полная антикорреляция фаз.

Кросс-вейвлетное преобразование между двумя рядами определяется соотношением

$$CWT_{1,2} = CWT_1 * CWT_2, \quad (1)$$

где CWT_1 и CWT_2 – непрерывные вейвлет-преобразования для ряда 1 и ряда 2.

Кросс-вейвлетное преобразование есть комплексная величина, имеющая амплитуду

$$A = CWT_{1,2} \quad (2)$$

и, соответственно, мгновенную (локальную) фазу

$$\Psi = ATAN(IM(CWT_{1,2}), RE(CWT_{1,2})). \quad (3)$$

При этом схожесть определяется как

$$S = \cos^N(\Psi), \quad (4)$$

где N – нечетное целое положительное число. Заметим, что чаще всего используют значение $N=1$.

Тогда получаем

$$S = \cos(\Psi). \quad (5)$$

В таком виде метод обычно рассматривается в литературе [12, 13].

Программу для демонстрации метода WAVELET-BASED SEMBLANCE ANALYSIS на языке программирования MATLAB разработал G.R.J. Cooper.

Эту бесплатную программу SEMBLANCE.M можно найти в Интернете.

Поскольку исходная программа есть только демонстрация метода, авторы статьи внесли в неё существенные дополнения с точки зрения анализа реальных природных рядов.

Усовершенствование программы было выполнено по следующему плану.

1 :

Проверка на корректность входных аргументов

T ; S1 ; S2 ; SCALES.

2 :

T = T(:);

S1 = S1(:);

S2 = S2(:);

3 :

Проверка на то, что длины вертикальных векторов

T ; S1 ; S2 одинаковы.

4 :

L = length(T);

if SCALES > L

return

end

Реально при исследованиях использовано условие :

SCALES = round(L ./ 4);

Также требуется выполнение условия :

SCALES >= 16

5 :

M1 = mean(S1);

M2 = mean(S2);

6 :

S1 = S1 - M1;

S2 = S2 - M2;

7 :

C1 = cwt(S1 , 1 : SCALES' , cmor1-1');

C2 = cwt(S2 , 1 : SCALES' , cmor1-1');

Заметим, что C1 и C2 - матрицы с комплексными элементами, соответственно (SCALES X L) каждая.

8 :

CTC = C1 .* conj(C2);

CTC - амплитуда кросс - вейвлетного преобразования.

9 :

SPT = atan2(imag(CTC) , real(CTC));

10 :

CC = cos (SPT);

CC - это и есть SEMBLANCE, матрица с действительными элементами и размерами (SCALES X L).

11 :

CCC = mean(CC);

CCC = CCC(:);

Усовершенствование, которое в значительной степени облегчает интерпретацию полученных результатов.

Получаем в результате удобный для интерпретации

SEMBLANCE - VECTOR CCC.

12 :

$CCCC = \text{mean}(CCC)$;

Получаем SEMBLANCE - SCALAR.

Результат по смыслу соответствует тому, что получается при нахождении линейного коэффициента корреляции между двумя рядами.

13 :

$S1 = S1 + M1$;

$S2 = S2 + M2$;

Тем самым возвращаем S1 и S2 к изначальному виду.

14 :

Далее можно строить различные графики.

Отметим, что построение $\text{cwt}()$ для ряда 1 (S1) и для ряда 2 (S2) требует применение команд типа $\text{imagesc}(\text{real}(C1))$ и $\text{imagesc}(\text{real}(C2))$, то есть не следует забывать, что C1 и C2 есть матрицы с комплексными значениями.

15 :

На этом всё.

Практическое применение метода было реализовано при анализе совместного поведения различных природных временных рядов (гидрологических, гидрохимических, гидроэкологических и др.).

Полученные данные свидетельствуют о том, что данный метод является эффективным универсальным инструментом обработки временных рядов различной природы.

Оценка синхронности колебаний гидрологического режима рек-аналогов.

Рассмотрим в качестве примера поведение четырех рек с существенно различными расходами воды, м³/с, принадлежащими одному бассейну:

- река А;
- река В;
- река С;
- река D.

Для анализа гидрологического режима использованы среднемесячные расходы воды в этих реках за период 1960...2009 годы.

Вычисленный линейный коэффициент корреляции между различными парами анализируемых рядов на всем временном интервале 50 лет приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Численные значения линейного коэффициента корреляции и величины SEMBLANCE - SCALAR для 50-летнего временного интервала

Анализируемая пара рек	Линейный коэффициент корреляции	Величина Semblance - Scalar
река А/река В	0,9142	0,7227
река А/река С	0,7209	0,4891
река А/река D	0,8769	0,5312
река В/река С	0,8242	0,6531
река В/река D	0,8922	0,6372
река С/река D	0,7778	0,6415

Однако поскольку линейный коэффициент корреляции определялся на всем временном интервале, ничего о схожести в поведении рек для конкретного сегмента внутри данного интервала мы сказать не можем.

Вместе с тем, весь временной интервал достаточно велик. В этой связи на некоторых его участках поведение рядов может быть весьма согласованным, а на некоторых участках значительно различатся (быть рассогласованным).

Рассмотренный в статье метод как раз и позволяет детализировать во времени совместное поведение пар различных рек.

На рис. 1 представлены некоторые из анализируемых гидрологических рядов – река А (DATA 1) и река В (DATA 2). Линейный коэффициент корреляции для них имеет наибольшее значение из всех анализируемых пар рек (см. таблицу 1).

Для рек А/С имеем наименьшее значение коэффициента корреляции.

Также на рис. 1 приведен SEMBLANCE - VECTOR, характеризующий мгновенную меру схожести между этими гидрологическими рядами (см. пункт 11 усовершенствований, введенных нами в исходную демонстрационную программу).

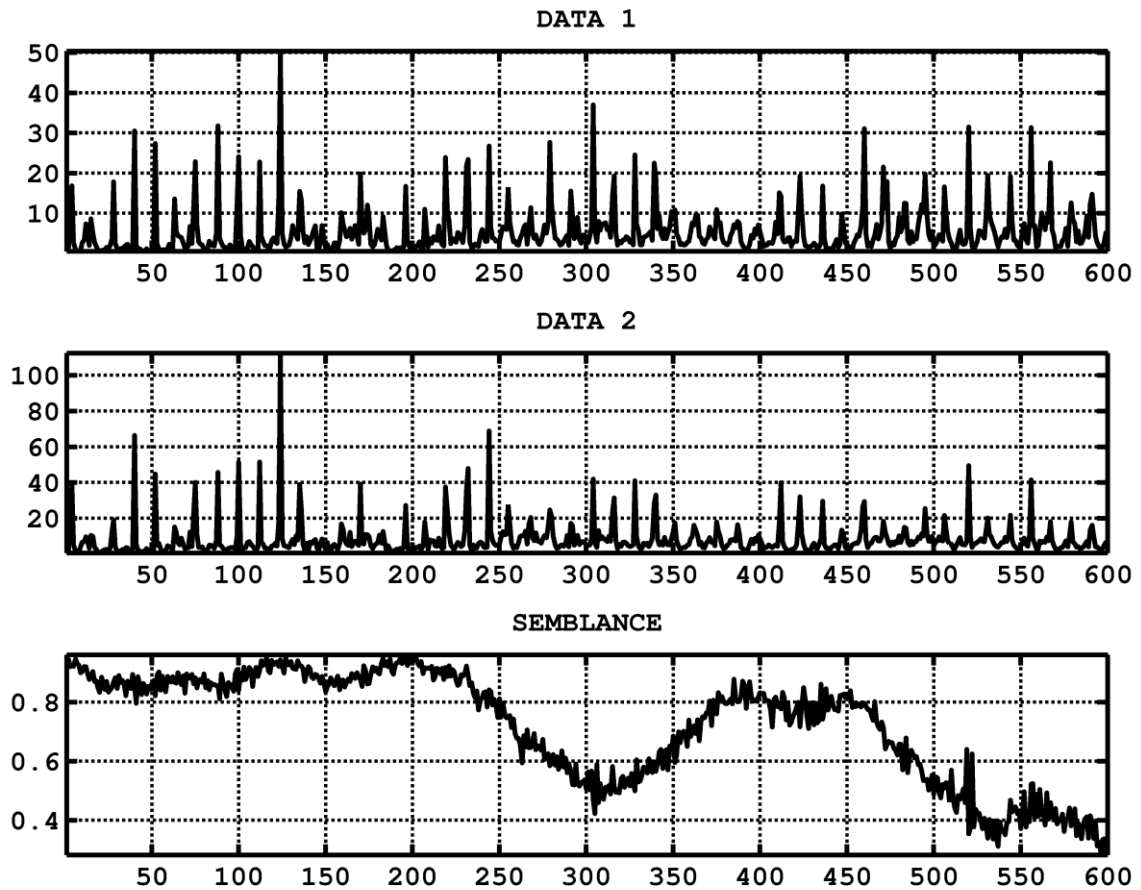


Рисунок 1 – Гидрологические ряды реки А и реки В и значение Semblance – Vector (Scales=150).

Как видно из нижнего графика, на протяжении примерно 200 месяцев аналогичность в поведении двух рек очень велика. На участке примерно от 200 до 300 месяцев происходит уже значительное уменьшение в их согласованности (когерентности), а на 300-м месяце наблюдается минимум согласованности. Далее, на участке 300...380 месяцев вновь происходит существенное улучшение в согласованности поведения среднемесячных расходов этих рек, и так далее.

На рис. 2 приведены для сравнения полученные вейвлет-спектры для реки А и реки В, а также значение SEMBLANCE - MATRIX, по которым можно оценить мгновенную степень согласования на различных длинах волн.

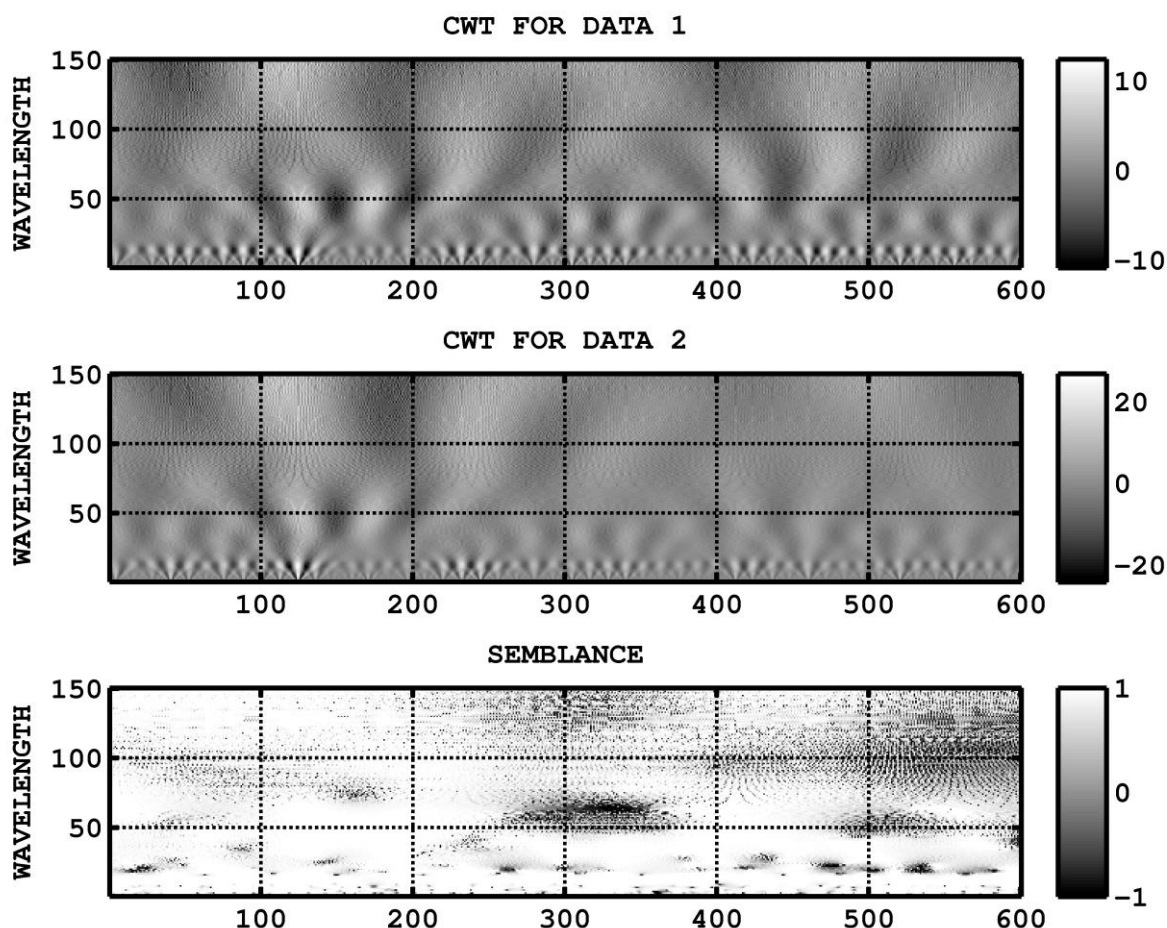


Рисунок 2 – Вейвлет - спектры реки А и реки В и значение Semblance – Matrix этих рядов.

Заметим, что обычно вейвлет – преобразования принято представлять в цвете. Однако в данном случае было использовано черно-белое представление результатов, которое оказалось более информативным.

Очевидно, что информация, полученная в результате вычислений согласно программы SEMBLANCE.M (см. рис. 2), воспринимается значительно труднее, чем проведенные нами вычисления (с последующей визуализацией) значений SEMBLANCE – VECTOR (рис. 1).

*) Следует учесть, что среднее арифметическое по столбцам SEMBLANCE – MATRIX есть SEMBLANCE – VECTOR, а среднее арифметическое для SEMBLANCE – VECTOR – это SEMBLANCE – SCALAR. С другой стороны, SEMBLANCE – SCALAR есть также среднее арифметическое по всем элементам SEMBLANCE – MATRIX.

Кроме того, предложено вычислять значения SEMBLANCE – SCALAR (см. пункт 12), который по смыслу является аналогом линейного коэффициента корреляции.

В таблице 1 приведены значения величины SEMBLANCE – SCALAR. *)

Как видно, между собой величины линейного коэффициента корреляции и SEMBLANCE – SCALAR простыми линейными соотношениями не связаны.

Анализ графиков для всех исследуемых пар рек, и особенно графиков для SEMBLANCE – VECTOR, показал, что для первых 16 лет (с 1960 и по 1975 годы) из рассмотренного 50-летнего промежутка времени практически во всех случаях наблюдается наиболее согласованное поведение в расходах (см., например, рис.1 и рис. 3, а также рис.2 и рис. 4).

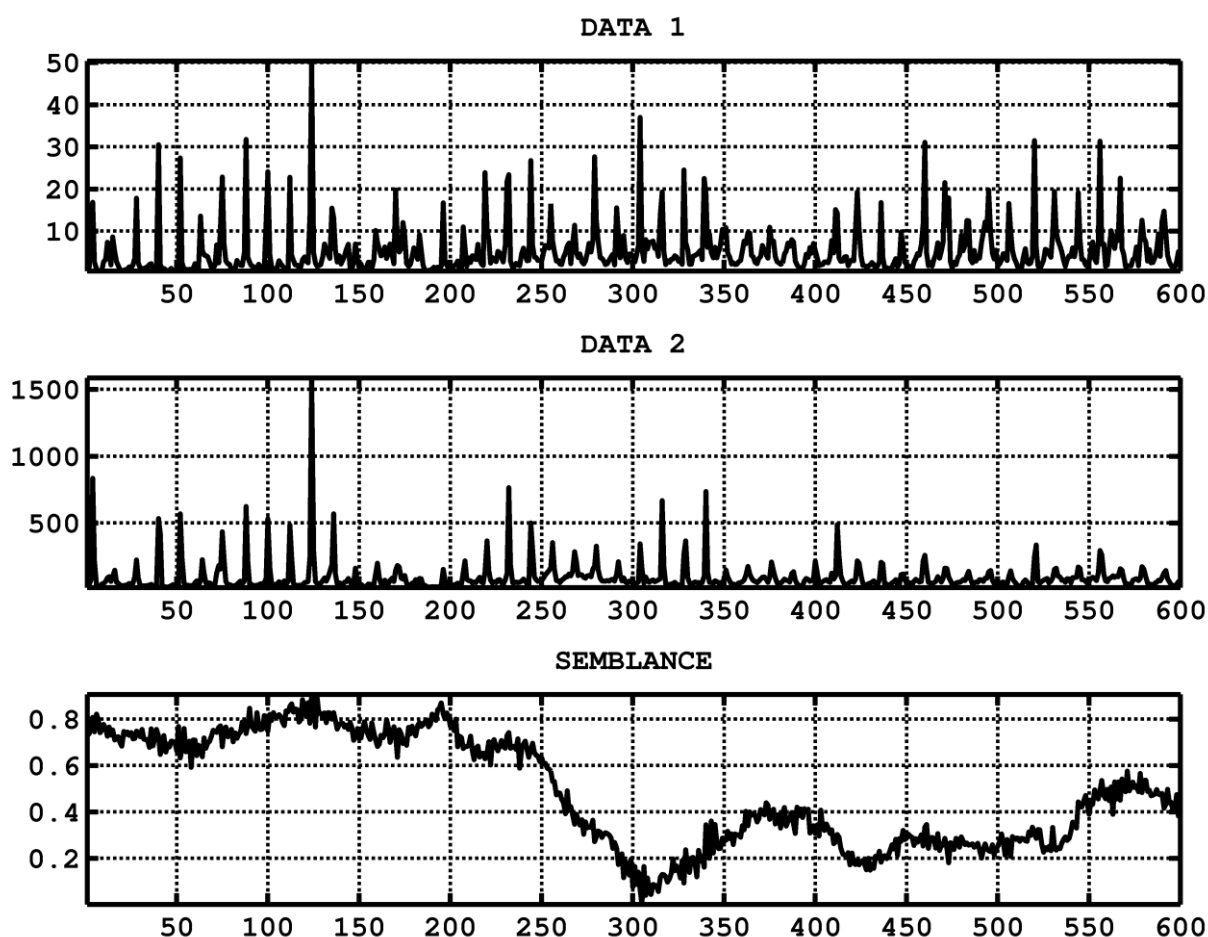


Рисунок 3 – Гидрологические ряды реки А и реки С и значение Semblance – Vector (Scales=150).

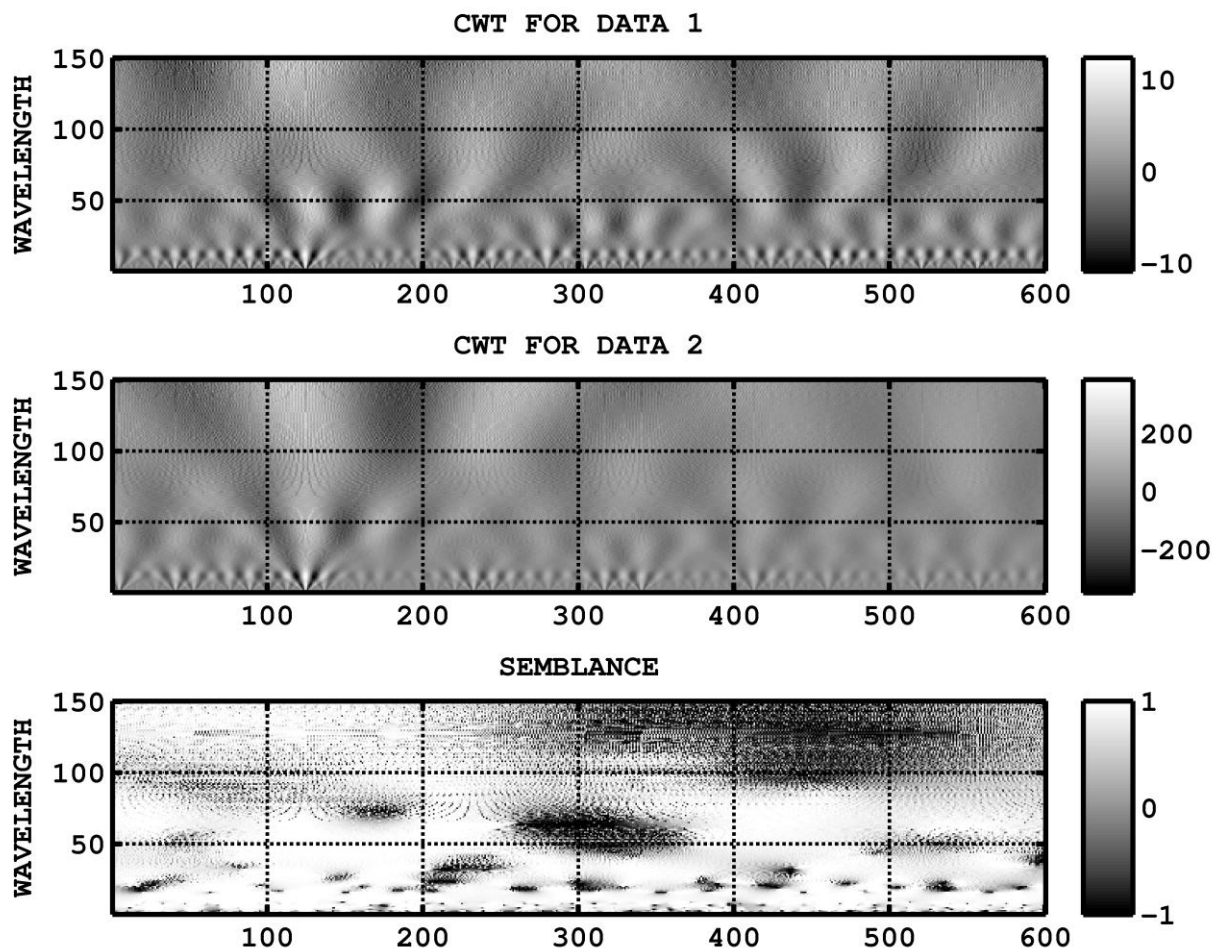


Рисунок 4 – Вейвлет - спектры реки А и реки С и значение Semblance – Matrix этих рядов.

Для этого временного сегмента линейные коэффициенты корреляции и величины SEMBLANCE – SCALAR будут иметь наибольшие значения (таблица 2).

Таблица 2 – Численные значения линейного коэффициента корреляции и величины SEMBLANCE - SCALAR для первого 16-летнего временного сегмента

Анализируемая пара рек	Линейный коэффициент корреляции	Величина Semblance - Scalar
река А/река В	0,9605	0,9101
река А/река С	0,8528	0,8339
река А/река D	0,9344	0,7830
река В/река С	0,8925	0,8780
река В/река D	0,9447	0,7918
река С/река D	0,8630	0,7334

Временной сегмент с наилучшей корреляцией между анализируемыми парами рек удалось обнаружить только с помощью рассмотренного в работе метода анализа.

Метод позволяет наиболее полно оценить степень мгновенной синхронности в поведении любых пар рек.

Выводы

1. Подробно рассмотрен метод WAVELET-BASED SEMBLANCE ANALYSIS, позволяющий оценить мгновенную синхронность в поведении двух временных рядов.

2. Приведены существенные дополнения к исходной демонстрационной программе, позволяющие проводить совместный анализ природных временных рядов.

3. Продемонстрировано применение усовершенствованной программы и выполнен анализ результатов расчетов при оценке мгновенной синхронности в поведении расходов воды двух рек одного бассейна.

Литература

1. Раткович Д.Я. Многолетние колебания речного стока. – Л.: Гидрометеоздат, 1976. – 255 с.
2. Дружинин И.П. Динамика многолетних колебаний речного стока/ И.П. Дружинин, Р.В. Смага, А.Н. Шевнин. – М.: Наука, 1991. – 174 с.
3. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. – Л.: Гидрометеоздат, 1984. – 448 с.
4. Лобода Н.С. Синхронность колебаний годового стока рек Украины./ Метеорологія, кліматологія та гідрологія, вип. 43. – Одеса, ОдГМІ, 2001. – С.250-257.
5. Артёменко В.А. Метод восстановления сверхбольших пропусков в гидрологических временных рядах/ В.А. Артёменко, В.В. Петрович// Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, вип. 93. – К.: Вид-во Націон. трансп. ун-ту, 2015. – С. 150-156.
6. Коваленко В.В. Гидрологическое обеспечение надежности строительных проектов при изменении климата. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2009. – 100 с.
7. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
8. Петрович В.В. Прогнозування погодно-кліматичних умов методом спектрального аналізу/ В.В. Петрович, В.А. Артеменко// Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, вип. 79. – К.: Вид-во Націон. трансп. ун-ту, 2010. – С. 37-49.
9. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 400 с.
10. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. – М.: ДМК Пресс. – 2005. – 304 с.
11. Любушин А.А. Вейвлет-анализ многолетних колебаний гидрологического режима рек бассейна Волги, Дона и Днепра/ А.А. Любушин, М.В. Болгов, М.В. Максютова. – Сб. "Экстремальные гидрологические события в Арало-Каспийском регионе". Труды международной научной конференции. – М.: 19-20 окт. 2006 г. – С.97-100.
12. Grinsted A., Moore J.C., Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. – Nonlinear Processes in Geophysics, 2004, 11. – P. 561-566.
13. Cooper G.R.J., Cowan D.R. Comparing time series using wavelet – based semblance analysis. – Computers and Geosciences, 2008, 34. – P. 95-102.

Рецензенти:

Кузло М.Т., д-р техн. наук, Національний університет водного господарства та природокористування.
Ткачук С.Г., д-р техн. наук, Національний транспортний університет.

Reviewers:

Kuzlo M.T., Dr. Tech. Sci., National University of Water and Environmental Engineering.
Tkachuk S.H., Dr. Tech. Sci., National Transport University.

Стаття надійшла до редакції: 27.07.2016 р.