

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

ЯКІСНИЙ АНАЛІЗ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКІВ ЧАСОВИХ КЛІМАТИЧНИХ РЯДІВ МЕТОДОМ КРОСС-РЕКУРРЕНТНИХ ГРАФІКІВ

Анотація. Проведено якісне дослідження синхронізації поведінки часових кліматичних рядів за допомогою нової та ефективно розробки нелінійного аналізу – методу кросс-рекуррентних графіків. Встановлено наявність фазового синхронізму у поведінці часових рядів сонячної активності, температури та атмосферних опадів.

Ключові слова: Часові ряди кліматичних даних та сонячної активності, кросс-рекуррентні графіки; синхронізм у поведінці часових кліматичних рядів та сонячної активності.

Аннотация. Проведено качественное исследование синхронизации поведения временных климатических рядов с помощью новой и эффективной разработки нелинейного анализа – метода кросс-рекуррентных графиков. Установлено наличие фазового синхронизма в поведении временных рядов солнечной активности, температуры воздуха и атмосферных осадков.

Ключевые слова: Временные ряды климатических данных и солнечной активности, кросс-рекуррентные графики, синхронизм в поведении временных климатических рядов и солнечной активности.

Annotation. By means of such method of chaotical dynamics as cross – recurrence plots (CRP) is organized study to synchronizing the behaviour of the temporary climatic series. Find presence to phase synchronizing in behaviour of the series of the Solar activity, of the air temperature and atmospheric precipitation.

Keywords: Chaotical dynamics, cross – recurrence plots (CRP), phase synchronizing, temporary series, Solar activity, air temperature, atmospheric precipitation.

Вступ

Як відомо, кліматичні умови (в першу чергу температура повітря та кількість атмосферних опадів) спричиняють виникнення таких небезпечних явищ як зсуви, селі, повені, які безпосередньо впливають на стан автомобільних доріг та мостів, безпечний та безперебійний рух транспорту. На боротьбу з наслідками стихійних лих витрачаються значні фінансові кошти.

З економічної точки зору більш доцільно перш за все прогнозувати причини, що формують виникнення небезпечних природних явищ, та планувати ефективні заходи щодо боротьби з ними.

В цих умовах необхідність розробки детальних прогнозів можливих змін кліматичних умов та їх врахування при плануванні виробничої діяльності дорожньої галузі на майбутнє набуває особливої актуальності [1].

У переважній більшості випадків при аналізі та подальшому прогнозі кліматичних процесів часовий ряд даних спостережень є єдиною інформацією, яку отримує спеціаліст. Тому найбільш повне використання даних спостережень, оцінка особливостей поведінки часових кліматичних рядів є запорукою побудови коректної та адекватної прогнозної моделі процесу, що досліджується.

При дослідженні часових рядів кліматичних даних спостережень повинні бути вирішені наступні питання.

По-перше, визначений характер процесу (періодичний, квазіперіодичний, хаотичний, випадковий та ін.). Один із можливих підходів до вирішення цього питання запропонований в [2].

По-друге, розглянуті особливості еволюції даного процесу: характер зміни режимів, виявлення трендів і т. п. [3].

По-третє, проведений порівняльний аналіз схожих, але неідентичних кліматичних часових рядів (виявлення подібності, синхронізації), що ї є метою даної статті.

При дослідженні використаний сучасний нелінійний підхід при порівнянні часових рядів – метод кросс-рекуррентних графіків [4, 5].

Кросс-рекуррентні графіки

Згідно [2], за допомогою рекуррентного аналізу є можливість досліджувати тільки один часовий ряд \vec{X} . При цьому цей часовий ряд може бути як одновимірним, так і багатовимірним.

Останнім часом набув застосування метод аналізу синхронності у поведінці двох рядів \vec{X} та \vec{Y} за допомогою кросс-рекуррентних графіків (cross-recurrence plots, скорочено CRP).

CRP поєднує в одному фазовому просторі вже дві траєкторії (\vec{X} та \vec{Y}). При цьому попадання всіх точок другої траєкторії в E -оточення всіх точок першої траєкторії і визначає CRP:

$$CRP [J, JJ] = H\left(E - \left\|X[\vec{J}] - Y[JJ]\right\|\right), \quad (1)$$

де $\vec{X} \in R^M$; $\vec{Y} \in R^M$;

$J = 1 \dots NX$; $JJ = 1 \dots NY$ - довжина рядів значень відповідно \vec{X} та \vec{Y} ;

E - розмір оточення;

$H(\bullet)$ - функція Хевісайда;

$\|\bullet\|$ - норма (переважно Евклідова), або відстань;

R^M - M - вимірний (лінійний) простір.

При умові синхронної поведінки двох рядів на CRP з'являються чіткі вертикальні структури. Але CRP набуває реального значення тільки тоді, якщо ряди (змінні стани) \vec{X} та \vec{Y} належать певній динамічній системі.

Таким чином, CRP дозволяють визначати ступінь пов'язаності рядів (у тому числі і фазову синхронізацію між рядами, що розглядаються).

З метою адекватного порівняння рядів, що досліджуються методом CRP, ці ряди попередньо нормувалися таким чином, аби будь-які складові цих рядів належали діапазону значень $[0; 1]$.

Поріг схожості процесів у CRP встановлюється за допомогою завдання величин EX та EY (з метою спрощення приймаємо, що $EX = EY$). Зрозуміло, що таким чином за допомогою CRP з'являється можливість вводити узагальнене поняття періодичності процесів (у тому числі і складні хаотичного виду періодичності, які у переважній більшості притаманні природним процесам).

Кросс-рекуррентний аналіз часових рядів проводили при різних значеннях величини E (розмір оточення дорівнював відповідно 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25).

Чутливість методу CRP добре ілюструє наступний приклад.

Як відомо, два генератора «випадкових» чисел $RAND()$ та $RANDN()$, що є в MATLAB, генерують різні за своєю природою «випадкові» числа: рівномірно розподілені в діапазоні $0 \dots 1$ числа в генераторі $RAND()$ та числа, що розподілені за нормальним законом у генераторі $RANDN()$.

При проведенні числового експерименту були використані однакові по довжині ряди «випадкових» чисел. Отриману CRP-картину взаємозв'язку рядів $RAND()$ та $RANDN()$ вважати повністю випадковою не можна, оскільки ця картина (рис. 1) не складається тільки із окремих крапок [2].

На наш погляд, цей факт свідчить про те, що навіть генерація «випадкових» чисел виконується за певними алгоритмами, тому деякі закономірності у таких «випадкових» рядах також будуть присутні. Тобто, CRP-метод чутливий настільки, що дозволяє виділяти дуже приховані взаємозв'язки між рядами, які недоступні переважній більшості методів аналізу таких процесів.

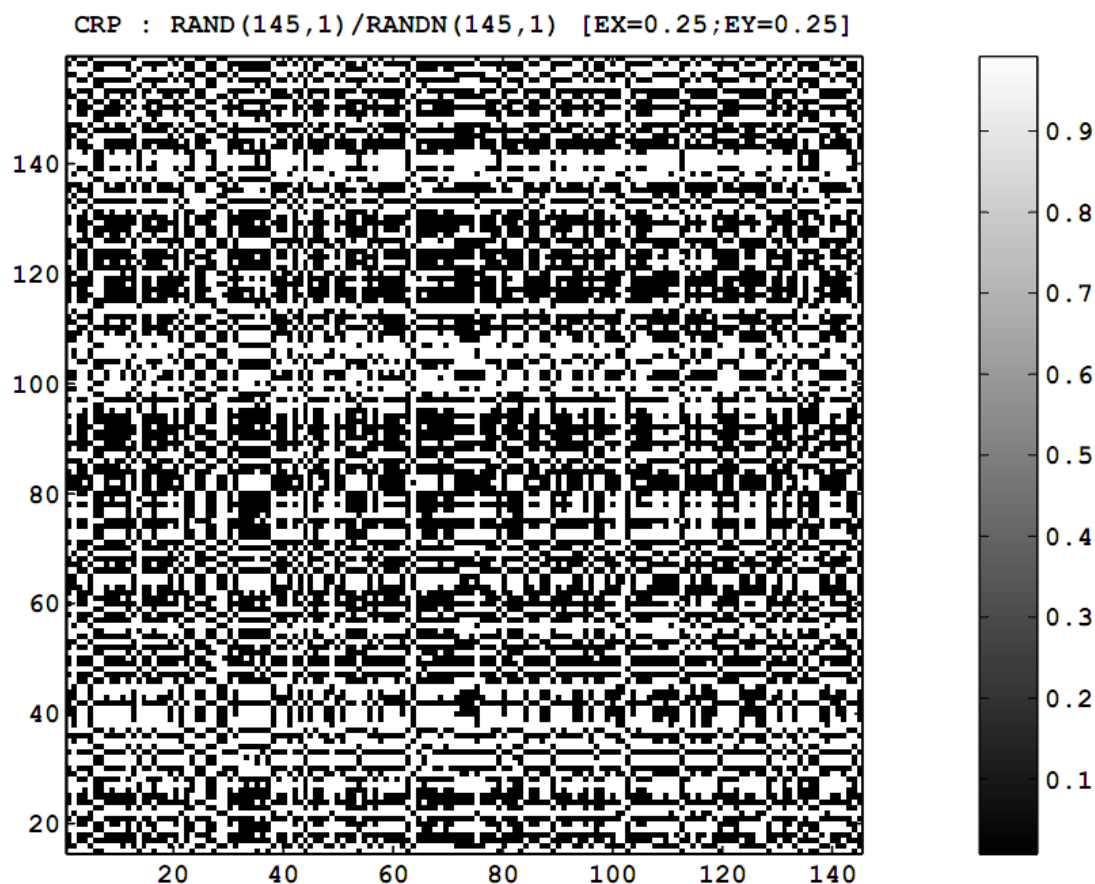


Рис. 1

Оцінка синхронізації часових кліматичних рядів та сонячної активності

Для ілюстрації можливостей метода CRP при оцінці взаємозв'язків часових рядів були використані за період 1860-2004 р.р. дані середньорічних значень температур повітря (ряд T) та середньорічних значень атмосферних опадів (ряд R) по м. Києву. При цьому кожний одновимірний ряд складався із 145 значень.

Оскільки кліматичні фактори в першу чергу обумовлені дією сонячної активності [6, 7], розглядався також взаємозв'язок температурного ряду та ряду атмосферних опадів із рядом чисел Вольфа W .

Як було зазначено вище, CRP-метод дозволяє досліджувати спільно тільки два часових ряди. Із цієї причини розглядали окремо пари рядів W та T (позначені на графіку як CRP W/T), рядів W та R (CRP W/R) та рядів T та R (CRP T/R).

При цьому було враховано, що ряди W , T та R є підсистемами однієї складної природньо-кліматичної системи [8]. Ефекти загальної взаємодії в таких системах викликають в останній час підвищену увагу дослідників в зв'язку з використанням для опису цих ефектів властивостей нелінійних динамічних систем та детермінованого хаосу [9].

Звичайно автори, що використовують CRP-метод, розглядають взаємозв'язок певних процесів, виділяючи діагоналі CRP. Однак така методика може бути застосована тільки для дослідження процесів з відносно простими законами взаємозв'язків. При дослідженні процесів із складними взаємозв'язками (як у даному випадку) діагональ CRP буде виділити досить складно, тому слід шукати безпосередні критерії взаємозв'язків.

CRP-картини були побудовані за програмою, розробленою авторами у системі MATLAB (FREEMAT).

Спочатку розглянемо спільний графік рядів чисел Вольфа W та температури T (рис. 2).

На рис. 3 наведений кросс-рекуррентний графік для цих часових рядів. Згідно рис. 3, при значеннях $EX = EY = 0,25$ одержуємо досить чітку картину, яку складають чорні та білі горизонтальні та вертикальні лінії та прямокутники.

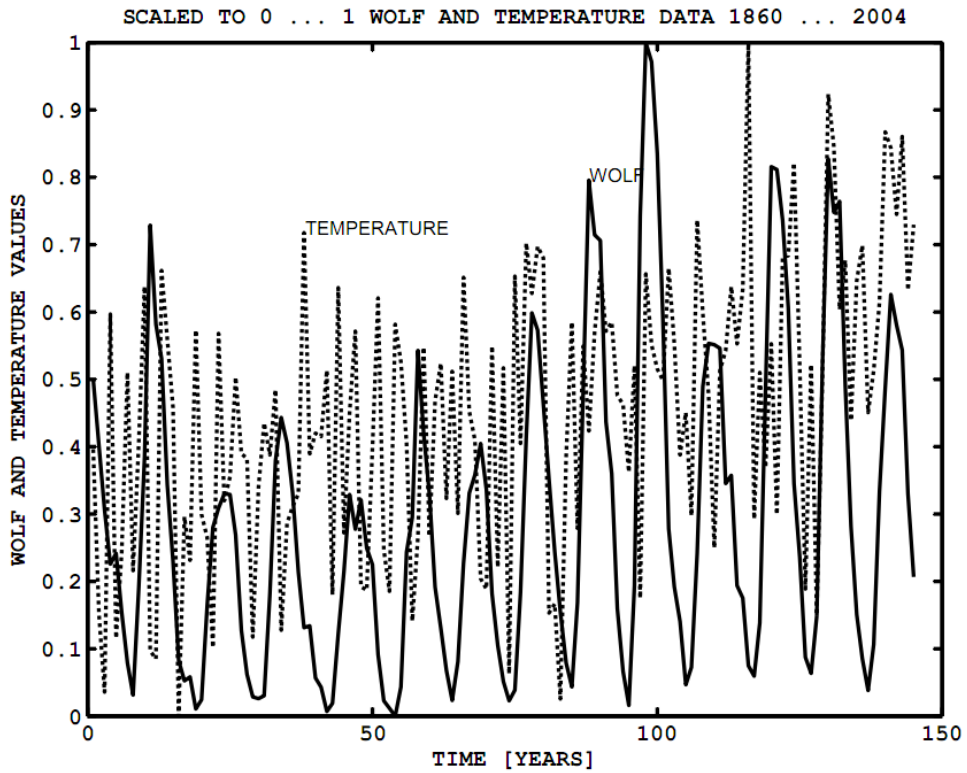


Рис. 2

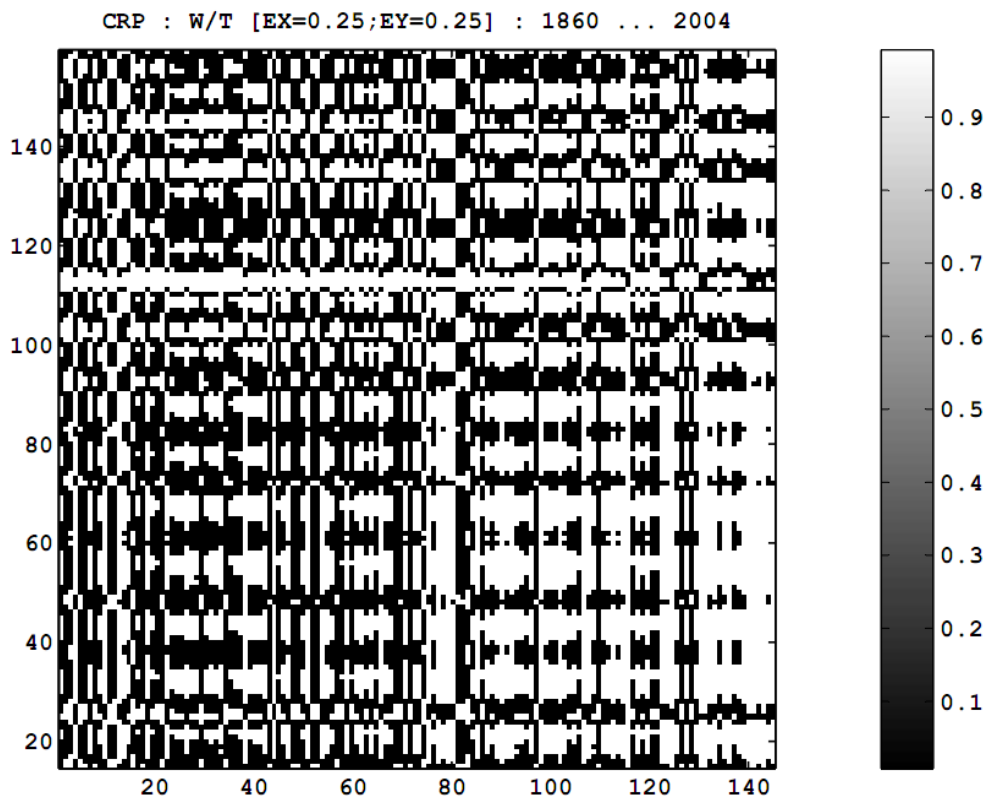


Рис.3

Виходячи із визначення CRP, можна на першому етапі досліджень говорити про міру схожості (і навіть взаємозв'язаності) часових процесів, що аналізуються. На це безпосередньо вказує переважання на CRP чорних ліній та

прямокутників, їх довжина (кількість та протяжність білих горизонтальних та вертикальних ліній та прямокутників – локальна міра різної поведінки процесів).

Характер чередування вертикальних та горизонтальних чорних ліній та прямокутників свідчить про складну, часом хаотичного виду періодичність процесів, що аналізуються. Зазначимо, що переважно вертикальна орієнтація структур може бути викликана тим, що Фур'є-спектр ряду W містить у більшому ступені низькочастотні складові, ніж Фур'є-спектр ряду T (тобто ряд W є більш «синусоїдальним», ніж ряд T). Біла горизонтальна лінія при значенні часу 115 по вертикальній вісі (вісі часу ряду T), а також біла вертикальна лінія при значенні часу близько 80 по горизонтальній вісі (вісі часу ряду W) чітко вказують на фазові переходи, що мали місце в цих часових рядах.

При цьому кількість білих вертикальних ліній, що характеризують подальші фазові переходи, стало більше після моменту часу 80 по горизонтальній вісі часу. Тобто, із деяких позицій можна говорити, що після цього моменту часу поведінка ряду T у порівнянні із поведінкою ряду W стала більш незалежною, тобто взаємозв'язок у поведінці цих рядів став слабкішим. Далі розглянемо спільну поведінку рядів W та R (рис. 4), а також їх кросс-рекуррентний графік (рис. 5).

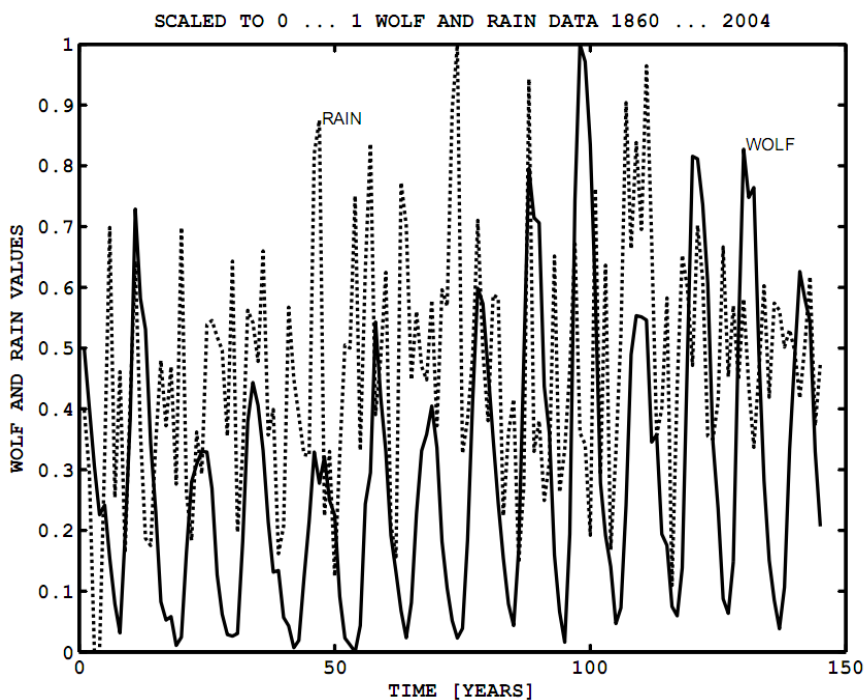


Рис. 4

Як видно, CRP-картина не є випадковою, чітко простежується взаємозв'язок між рядами W та R (переважання чорних ліній та прямокутників).

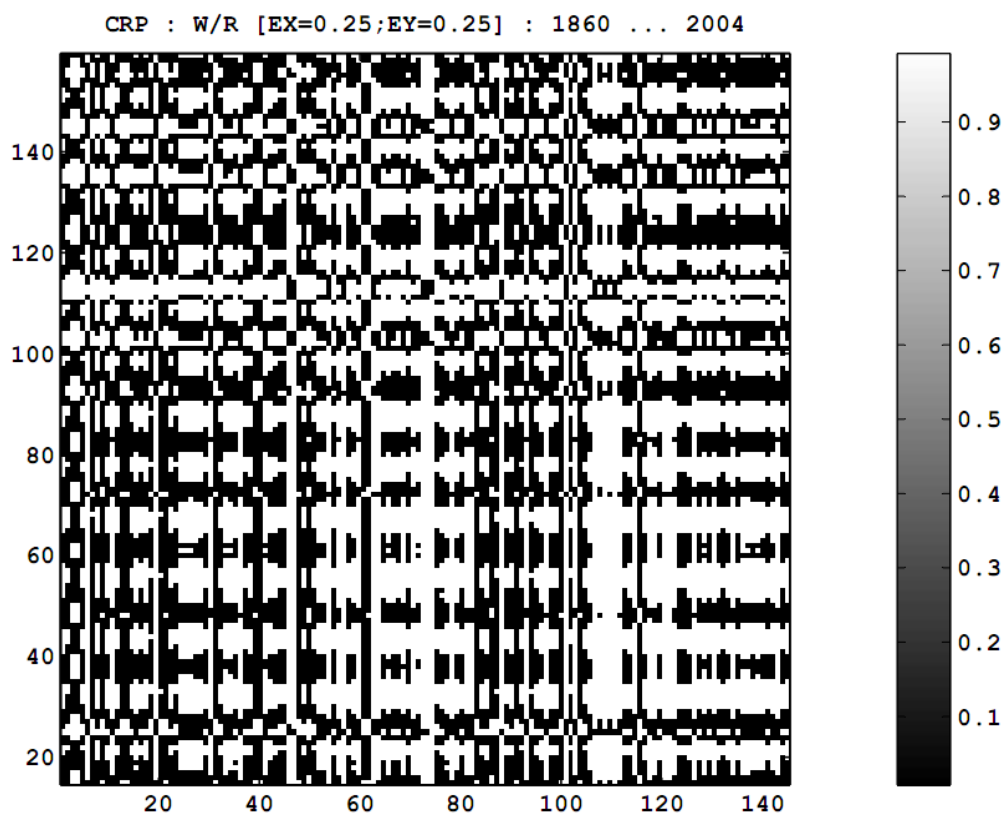


Рис. 5

Як і в попередньому CRP, вертикальні та горизонтальні чорні лінії та прямокутники свідчать про складну хаотичну періодичність процесів.

Вертикальна орієнтація протяжних чорних структур вказує на те, що ряд W є більш «синусоїдальний», ніж ряд R .

Також на рис. 5 чітко вирізняється біла горизонтальна лінія при значенні часу 110 по вертикальній вісі (вісі R) та біла вертикальна лінія по горизонтальній вісі (вісі W) при тому ж значенні часу. Тобто при значенні часу 110 ($1860+110=1970$ р.) спостерігалися спільні фазові переходи в цих часових рядах. Порівняння CRP-картин W/T та W/R свідчить про те, що взаємозв'язок рядів W/R є значно складніший, ніж взаємозв'язок рядів W/T .

На рис. 6 наведені графіки рядів T та R , на рис. 7 – CRP для цих рядів.

Як з'ясувалось, найбільш оптимальними з точки зору візуалізації будуть CRP, побудовані при значеннях $EX = EY = 0,10\dots 0,15$.

Згідно рис. 7, є певний взаємозв'язок між рядами T та R (визначається сполученням чорних ліній та точок).

У порівнянні із CRP рядів W/T та W/R , які достатньо схожі (рис. 3 та рис. 5), вид CRP рядів T/R у переважній більшості складається з окремих чорних крапок і є відмінним від попередніх графіків.

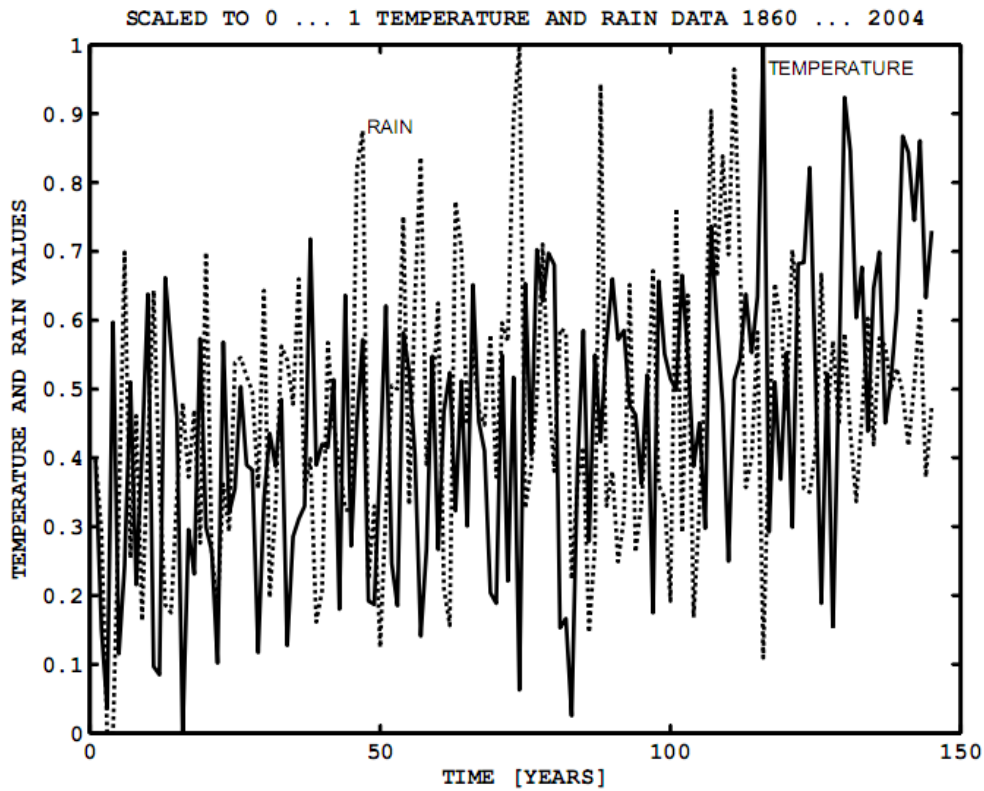


Рис. 6

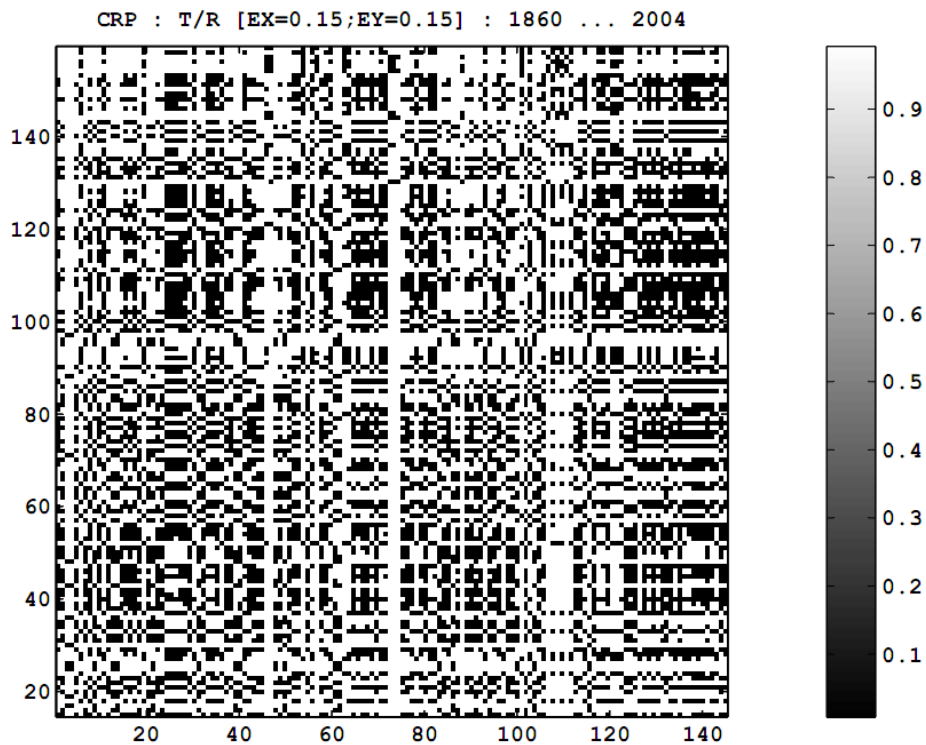


Рис. 7

У цьому зв'язку можна також говорити про те, що ряди T та R менше виявляють свою синхронність у часі. Взаємозв'язок цих рядів має більш складний характер у порівнянні із взаємозв'язком рядів W та R , а тим більше рядів W та T .

На цьому етапі досліджень конкретний вид взаємозв'язків часових рядів не розглядався, був лише установлений сам факт наявності таких взаємозв'язків та деякі якісні деталі процесу, що досліджувався. Кількісні характеристики взаємозв'язків часових кліматичних та гідрологічних рядів при використанні CRP-методу будуть наведені в наступних публікаціях по цьому питанню.

Висновки

Розглянуто ступінь взаємозв'язків часових рядів чисел Вольфа W , температури T та атмосферних опадів R із позиції синхронності їх поведінки.

В результаті аналізу методом CRP встановлено наявність загального фазового синхронізму у поведінці рядів W , T та R . При цьому для рядів W та T спостерігається достатньо сильна синхронність у поведінці цих рядів, для рядів W та R - більш слабка синхронність, що узгоджується із сталими загально прийнятими поглядами на взаємозв'язок цих процесів, і певним чином свідчить про надійність CRP-аналізу. Для рядів T та R така синхронність є достатньо слабкою (у порівнянні із синхронністю рядів W / T та W / R), тобто між поведінкою цих рядів існує лише слабкий фазовий синхронізм.

Література

1. Литвиненко А.С. Дослідження циклічності погодно-кліматичних умов України в зв'язку з прогнозуванням впливу небезпечних природних явищ на стан автомобільних доріг// Дороги і мости. –Вип.5. – К.: ДерждорНДІ. – 2006. –С.74-89.
2. Петрович В.В., Артеменко В.А. Дослідження особливостей часового ряду кліматичних даних методом рекуррентних графіків // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. –Вип.78. – К.: НТУ. – 2010. – С. 92-107.
3. Петрович В.В., Артеменко В.А. Порівняльна оцінка виникнення фазових переходів в часових рядах температури// Дороги і мости. –Вип.12. – К.: ДерждорНДІ. – 2010. – С.150–158.
4. Marwan N., Thiel M., Nowaczyk N.R. Gross recurrence plot based synchronization of time series. – Nonlinear Processes in Geophysics, (3/4). – 2002. – P.325-331.
5. Marwan N., Kurths J. Cross recurrence plots and their applications. – Mathematical Physics Research at the Cutting Edge. – Hombpunge: Nova Science Publishers. – 2004. – P.101–139.
6. Витинский Ю.И., Оль А.И., Сазонов Б.И. Солнце и атмосфера Земли. – Л.: – Гидрометеиздат. – 1976. – 351 с.
7. Герман Дж.Р., Голдберг Р.А. Солнце, погода и климат. – Л.: – Гидрометеиздат. – 1981. – 319 с.
8. Мохов И.И. Диагностика структуры климатической системы. – СПб.: – Гидрометеиздат. – 1993. – 271 с.
9. Петрович В.В., Артеменко В.А. Застосування апарата нелінійної динаміки для аналізу часових рядів гідрометеорологічної інформації// Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – Вип.80. – К.: НТУ. – 2011. – С. 120-138.