УДК 625.72:551.509.33

МЕТОД НАДДОВГОСТРОКОВОГО ПРОГНОЗУ ЗМІН В ЧАСОВИХ КЛІМАТИЧНИХ РЯДАХ

Петрович В.В.

Національний транспортний університет

Артеменко В.А.

Український науково-дослідний гідрометеорологічний інститут

Вступ

Проведені за останні роки дослідження показують,що кліматичні умови на території України істотно змінюються [1, 2].

Негативний вплив зміни кліматичних умов (і в першу чергу температури повітря та кількості атмосферних опадів) проявляється у зростанні повторюваності таких небезпечних природних явищ як зсуви, селі, повіні, які безпосередньо впливають на стан автомобільних доріг та мостів,безпечний та безперебійний рух транспорту.

На ліквідацію наслідків руйнівної дії небезпечних природних явищ постійно виділяють значні кошти [3-5].

В цих умовах необхідність розробки детальних прогнозів можливих змін кліматичних умов та їх врахування при плануванні виробничої діяльності дорожньої галузі України на майбутнє набуває особливої актуальності[6].

Прогнози на рік, декілька років та навіть десятиріччя носять назву наддовгострокових прогнозів (ультрадовгострокових).

Результати таких прогнозів в першу чергу необхідно враховувати при проектуванні реконструкції автомобільних доріг та мостів, плануванні середніх та капітальних ремонтів, визначенні гідрологічної ситуації на небезпечних з точки зору появи можливих повіней ділянках річок.

Як відомо, зміни в часових кліматичних рядах підпорядковуються складним законам, у поведінці таких рядів відсутня як повна періодичність, так і абсолютний хаос (наприклад, [7]).

Прогнозування поведінки таких рядів звичайно базувалось на трактовці явищ як випадкових. На сучасному етапі досліджень використовуються методи, що дозволяють проводити прогнозування на базі аналізу тільки конкретного часового ряду.

Застосування такого підходу до наддовгострокового прогнозування дає досить обнадійливі результати [8].

В статті аналізується достатньо простий метод наддовгострокового прогнозу, що запропонований авторами. Метод базується на використанні відомих лінійних різницевих рівнянь із аргументом,що відхиляється (рівнянь “із затримкою”).

Продовження одномірних часових рядів

Розглянемо метод продовження одномірних часових рядів довжиною **N** із складових ряду відповідно S(1); S(2); S(3); …S(N).

Як відомо, будь-який природний ряд породжується певним процесом, в основі якого закладено цілком визначені закономірності. Виявляючи та аналізуючи такі закономірності, можливо здійснювати прогнозування поведінки ряду.

Наявність цих закономірностей виявляється перш за все в тому, що наступні складові ряду певним чином залежить від його попередніх складових.

Оскільки такі закономірності звичайно невідомі, при досить загальній постановці складність задач прогнозування ряду непомірно зростає.

Тому на першому етапі аналізу будемо вважати, що наступні складові залежать від попередніх складових ряду лінійним чином.

У найпростішому випадку можна записати, що

$$S(2) = K1 \cdot S(1);$$

$$S(3) = K1 \cdot S(2);$$

$$S(4) = K1 \cdot S(3);$$

$$\dots\dots\dots\dots\dots\dots$$

$$S(N + 1) = K \cdot S(N),$$

де $K1 = S(2)/S(1)$, або $K1 = S(3)/S(2)$; … $K1 = S(N + 1)/S(N)$.

Тобто попередньо приймаємо значення коефіцієнта $K1 = \text{const}$ (однаковим) для цього часового ряду.

На практиці для визначення K1 звичайно використовують метод найменших квадратів або інший подібний метод, що дозволяє значно зменшити неминучі помилки, які виникають при одержанні вихідних даних і далі присутні в складових ряду.

Таким чином, маючи числове значення коефіцієнта K1, можна продовжити певний вихідний часовий ряд. Наприклад,якщо маємо ряд S(1); S(2); S(3); S(4); S(5) та нове значення $S(6) = K1 \cdot S(5)$, одержуємо вже ряд із шести значень. Для сьомого значення ряду відповідно одержуємо $S(7) = K1 \cdot S(6)$, і так далі. Тобто вихідний ряд подовжено на два значення або, з інших позицій, на дві одиниці часу вперед.

Однак для конкретних прогнозів вважати,що наступна складова ряду залежить тільки від такої попередньої складової, є неприйнятним.

Зважаючи на те, що природні часові ряди підпорядковуються складним законам, для одержання достатньо надійних прогнозів слід враховувати, що будь-яке наступне значення ряду певним чином залежить від попередніх значень ряду.

Так, наприклад, при прогнозі середньорічного хода температур у Києві (див. нижче) приймали, що кожне наступне значення складової безпосередньо залежить від 20 попередніх складових ряду температури.

Тобто для цього часового ряду залежність від 20 попередніх значень можна трактувати як певне “запізнювання” на 20 значень (20 часових одиниць).

Тому у дослідженні використовували такий параметр процесу, як **DELAY**, тобто “затримка”[9].

З метою викладення основної ідеї простого метода наддовгострокового прогнозу поведінки гідрометеорологічних часових рядів розглянемо випадок,коли **DELAY**=3.

Так, для ряду із шести складових

$$S(1);\ S(2);\ S(3);\ S(4);\ S(5);S(6) \tag{1}$$

можна записати, що

$$\begin{aligned} S(4) &= K1\cdot S(1) + K2\cdot S(2) + K3\cdot S(3);\\ S(5) &= K1\cdot S(2) + K2\cdot S(3) + K3\cdot S(4);\\ S(6) &= K1\cdot S(3) + K2\cdot S(4) + K3\cdot S(5). \end{aligned} \tag{2}$$

У матрично-векторному вигляді вираз (2) можна представити як

$$\begin{bmatrix} S(1) & S(2) & S(3)\\ S(2) & S(3) & S(4)\\ S(3) & S(4) & S(5) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K1\\ K2\\ K3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S(4)\\ S(5)\\ S(6) \end{bmatrix} \tag{3}$$

Значення коефіцієнтів K1,K2,K3 (невідомі величини) в (3) легко визначити,якщо розв'язувати систему лінійних алгебраїчних рівнянь відносно K.

При використанні системи **MATLAB**[10] процес реалізується за допомогою лише одного оператора (оператора оберненого ділення\ ).

Визначивши числові значення складових вектора коефіцієнтів K, далі визначаємо наступне значення для ряду (1):

$$S(7) = K1\cdot S(4) + K2\cdot S(5) + K3\cdot S(6), \tag{4}$$

або

$$S(7) = \begin{bmatrix} S(4) & S(5) & S(6) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K1\\ K2\\ K3 \end{bmatrix}. \tag{5}$$

Якщо необхідно подовжити часовий ряд ще на одне значення,слід обчислити

$$S(8) = \begin{bmatrix} S(5) & S(6) & S(7) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K1\\ K2\\ K3 \end{bmatrix}, \tag{6}$$

і так далі.

Тобто за одну ітерацію додається (прогнозується) одна складова ряду.

Процедура побудови матриці

$$\begin{bmatrix} S(1) & S(2) & S(3)\\ S(2) & S(3) & S(4)\\ S(3) & S(4) & S(5) \end{bmatrix} \tag{7}$$

виразу (3) із позицій динамічного хаосу[11] відповідає процедурі реконструкції фазового простору багатовимірової динамічної системи по одновимірововому часовому ряду.

З цих позицій матрицю (7) можна записати у вигляді

$$\begin{bmatrix} X(1) & Y(1) & Z(1) \\ X(2) & Y(2) & Z(2) \\ X(3) & Y(3) & Z(3) \end{bmatrix} \tag{8}$$

Таким чином, відбудовуємо тривимірну динамічну систему по одновимірну часовому ряду.

Тобто параметр **DELAY**=3 у даному конкретному випадку є розмірністю динамічної системи, яка відновлюється.

При цьому вектор

$$\begin{bmatrix} K1 \\ K2 \\ K3 \end{bmatrix}$$

із виразу (3) можна розглядати як оператор еволюції динамічної системи (7), а вектор

$$\begin{bmatrix} S(4) \\ S(5) \\ S(6) \end{bmatrix}$$

як такий,що певним чином “зібраний” із фазового простору цієї динамічної системи.

На цьому і базується можливість прогнозування поведінки часового ряду певного природного процесу.

Такий підхід до проблеми із сучасних позицій дає можливість проводити конкретний прогноз за допомогою відомих лінійних рівнянь “із затримкою”.

Зрозуміло,що у даному випадку оператор еволюції також є лінійним, що вважається достатньо грубим наближенням для реальних часових рядів. Однак на практиці запропонований метод при застосуванні певних поліпшувальних процес процедур дає можливість прогнозувати ряди навіть із достатньо складною поведінкою на конкретному часовому інтервалі.

Зазначимо, що іноді при практичному прогнозуванні задовільні результати досягаються навіть при значенні, наприклад, і параметру **DELAY**=3. При цьому довжина ряду є такою,що можливо скласти не тільки квадратну матрицю, як у виразі (3), але і прямокутну, що витягнута у вертикальному напрямку.

Наприклад, для ряду S(1); S(2); S(3);…S(10) одержуємо

$$\begin{bmatrix} S(1) & S(2) & S(3) \\ S(2) & S(3) & S(4) \\ S(3) & S(4) & S(5) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ S(7) & S(8) & S(9) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K1 \\ K2 \\ K3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S(4) \\ S(5) \\ S(6) \\ \vdots \\ S(10) \end{bmatrix},$$

або **A·B=C,**

де $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} K1 \\ K2 \\ K3 \end{bmatrix}$.

Як бачимо, розмір матриці **A** буде 7х3, розмір вектора **B-**відповідно3х1, а розмір вектора **C**-7х1.

Виконати **AxB** неможливо у зв'язку із невідповідністю їх розмірів із тими, що вимагає операція матричного множення.

Оскільки в цьому випадку число рівнянь буде більше числа змінних (відповідно 7 та 3), маємо перевизначену систему рівнянь.

Надлишок даних у цьому випадку гарантує, що окремі помилки даних натурних спостережень у значній мірі будуть зменшені (нівельовані).

Методика попередньої обробки вихідних даних

З точки зору надійності результатів слід розглядати таку довжину ряду, при якій прогнозування виконується із найменшими помилками.

Із таких позицій достатньо довгий ряд не є проблемою для аналізу, але, разом з цим, серйозна нестача довжини вихідного ряду даних може зробити прогнозування неможливим.

У певному випадку можливо взагалі відмовитися від будь-якої попередньої обробки даних. Це перш за все пов'язано з тим, що у вихідних даних може міститися інформація, що важлива для процесу прогнозування.

Таку інформацію виявляє, аналізує і далі відповідно використовує сама процедура прогнозування.

На практиці для реальних складних рядів вихідні дані попередньо обробляються (фільтрують) таким чином, щоб не усувати цю важливу інформацію.

У даному дослідженні для обробки вихідних даних використовували п'ятиточковий лінійний фільтр виду

$$S(I) = \frac{S(I-2)+S(I-1)+S(I)+S(I+1)+S(I+2)}{5} \tag{9}$$

Так, наприклад, фільтроване таким фільтром значення для 10-ї складової вихідного ряду буде

$$S(10) = \frac{S(8)+S(9)+S(10)+S(11)+S(12)}{5}$$

(зрозуміло, що довжина вихідного ряду буде не менше 12).

У крайньому випадку, згідно (9), мінімальна довжина вихідного ряду буде дорівнювати 5.

Перші два значення та два останніх значення вихідного ряду не можуть бути оброблені цим фільтром (відповідно профільтровані).

Для збереження довжини ряду, що був певним чином профільтрований, і досягненню відповідності його ряду вихідному, були надані певні значення перших двох та останніх двох складових ряду:

$$
\begin{gathered}
SF(1) = S(1); \\
SF(2) = S(2); \qquad (10) \\
SF(END\text{-}1) = S(END\text{-}1); \\
SF(END) = S(END),
\end{gathered}
$$

де SF – фільтрована складова ряду;
S() – складова вихідного ряду;
END – індекс,що визначає останню складову ряду.

Як показують проведені дослідження, спотворення на краях ряду, що був попередньо профільтрований, певним чином впливають на процедуру прогнозування.

Тому слід відкидати перші дві та останні дві складові ряду, що був попередньо профільтрований, і тільки після цього використовувати дані при подальшому прогнозуванні.

Фільтр можна застосовувати декілька разів, послідовно фільтруючи попередньо профільтровані дані.

У дослідженнях фільтрацію виконували послідовно 5 разів, але при цьому не відкидали ніяких складових. Замість цього перед подачею 5 разів профільтрованого ряду на вхід системи прогнозування відразу вилучались перші 10 та останні 10 складових ряду, тобто вилучались вони навіть із деяким запасом у порівнянні з вимогами (9) та (10).

Зазначимо,що при реалізації роботи фільтра типу (9) для ряду довжиною більше 5 складових звичайно використовують цикл типу **FOR…ENDFOR**. Однак у системі MATLAB (а також у сучасному FORTRAN) є можливість обходитись без даного циклу.Такий варіант реалізації фільтра, що працює значно швидше, і був використаний у дослідженні.

При розрахунках враховувався також той факт, що в гідрометеорологічних часових рядах мають місце фазові переходи. Тобто поведінка ряду на певних відрізках, що відокремлені один від одного точками фазових переходів, може значно відрізнятись [7].

При спробі обробити всі вихідні дані точність прогнозу може виявитись навіть гіршою, ніж при використанні більш короткого часового ряду.

Така ситуація можлива, наприклад, при відносно невеликій величині **DELAY** (розмірності фазового простору),- модель просто не зможе обробити всі фазові переходи у даному часовому ряді. Однак при поступовому збільшенні параметра **DELAY** якість прогнозу значно поліпшується, оскільки модель починає вже більш-менш адекватно обробляти такий часовий ряд із фазовими переходами.

Наддовгостроковий прогноз температур

Як приклад був виконаний наддовгостроковий прогноз температури повітря для Києва, де розподіли температури за певні часові інтервали є досить складними та мінливими.

Вихідний часовий ряд середньорічних температур повітря для Києва наведений на рис. 1.

Цей вихідний ряд має досить потужні осциляції, які значно утруднюють процес прогнозування [12]. У цьому зв’язку вихідний ряд попередньо зазнавав п’ятикратного фільтрування за допомогою лінійного фільтру виду (9). Це дало змогу значно зменшити осциляції (зберігаючи при цьому загальний хід кривої температур).

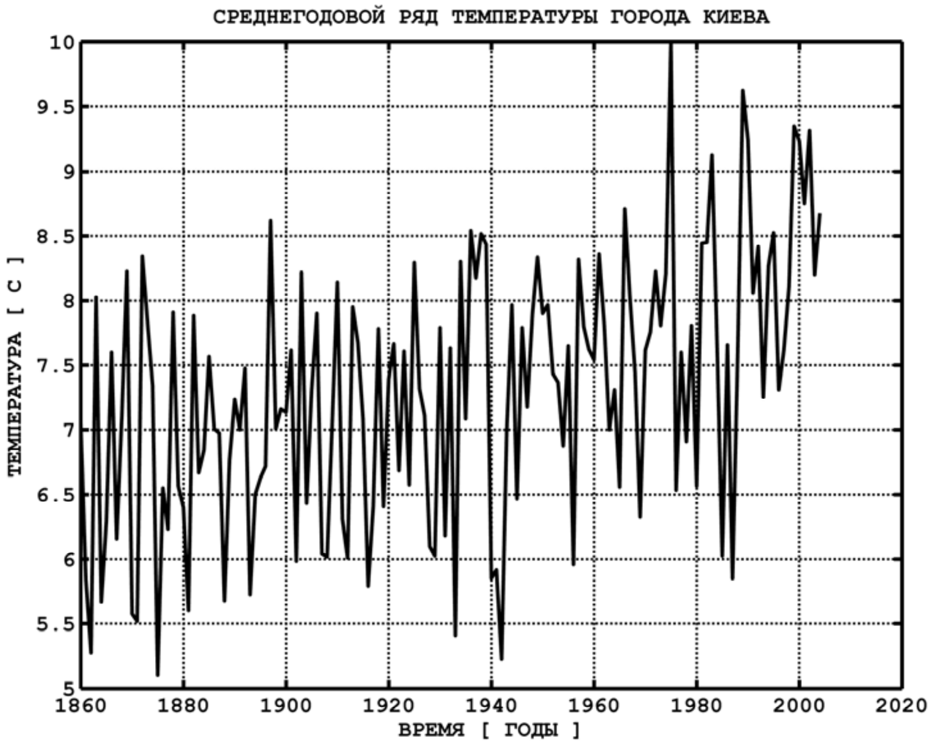

Рис. 1. Вихідний часовий ряд середньорічних температур повітря для Києва

Фільтровані дані наведені на рис. 2, результати прогнозу подані на рис. 3.

Максимальна похибка прогнозу при цьому становила 0,15 С°.

Незважаючи на той факт, що при даному методі прогнозування оперували у значній мірі фільтрованим (згладженим) вихідним рядом, прийнятий ступінь фільтрування дозволив зберегти головну тенденцію у поведінці ряду, але без прив'язування до окремих числових значень його складових.

Відмітимо також, що у вихідному ряді було декілька фазових переходів. Але навіть при їх наявності у часовому ряді температур повітря процедура прогнозування виконується належним чином.

Метод прогнозування, що розглянутий вище, достатньо універсальний і може бути реалізований при передбаченні поведінки часових рядів будь-яких кліматичних та гідрологічних процесів.

Висновки

1. Розглянуто прогнозування поведінки гідрометеорологічних часових рядів на достатньо тривалий проміжок часу, яке базується на використанні відомих лінійних різницевих рівнянь із аргументом,що відхиляється (рівнянь "із затримкою").

   Наведений алгоритм методу, який аналізує процес прогнозування з точки зору векторно-матричних обчислень, в нотації, що збігається (або є близькою) до мови програмування надвисокого рівня **MATLAB.**

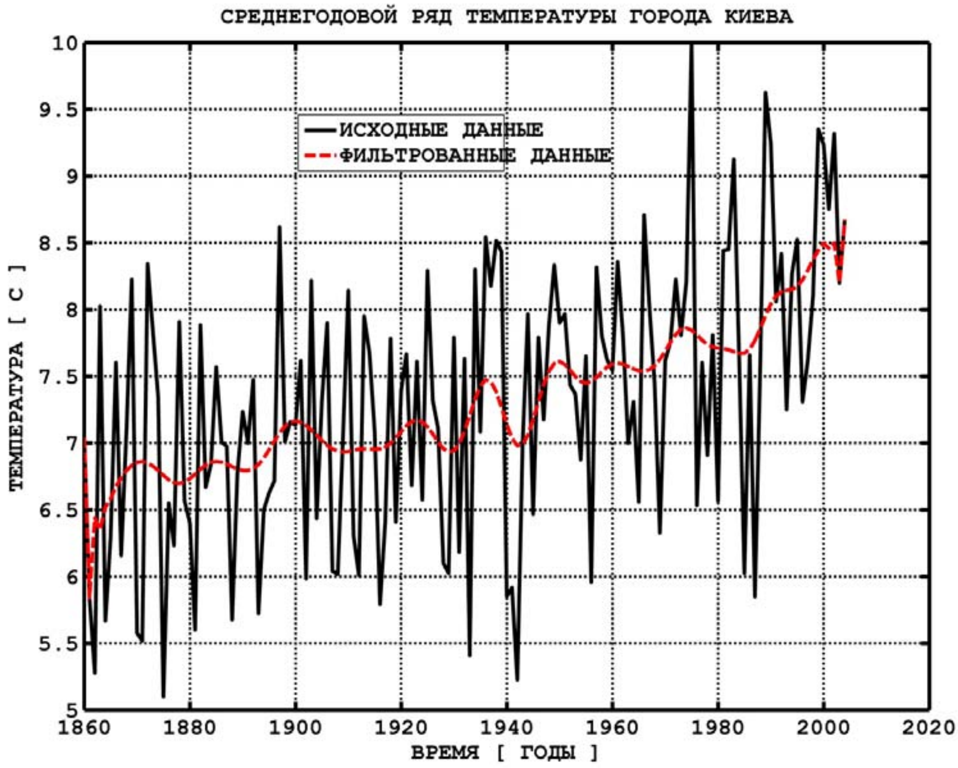

Рис. 2. Фільтровані дані вихідного ряду середньорічних температур повітря

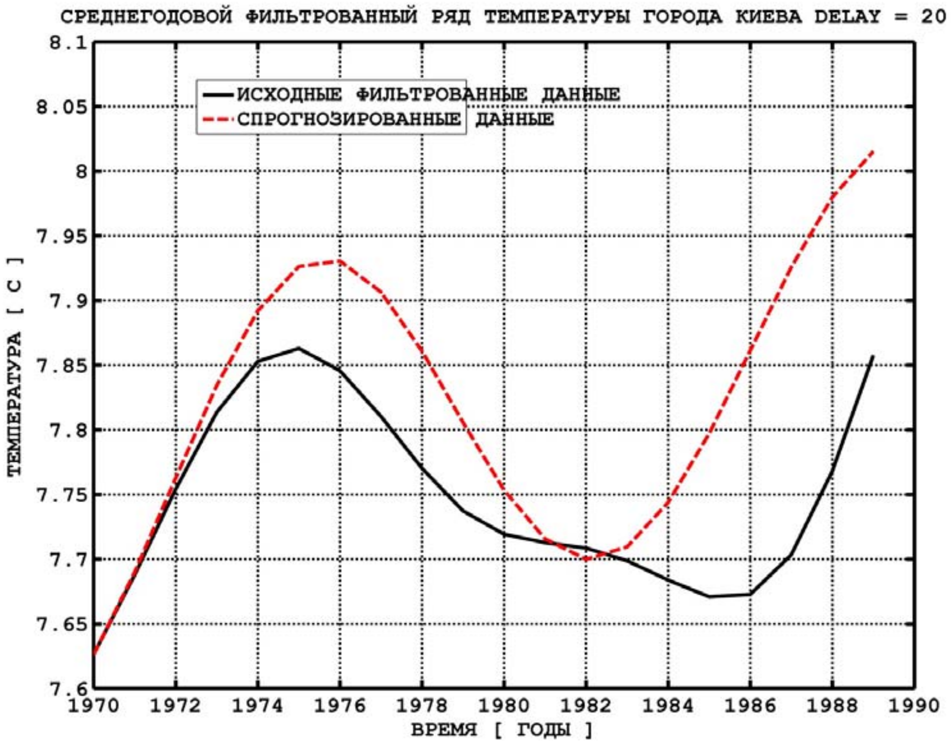

Рис. 3. Результати над довгострокового прогнозу температур повітря для Києва

2. Застосування та аналіз особливостей даного метода із урахуванням сучасних позицій нелінійної динаміки та динамічного хаосу дозволив адекватно прогнозувати поведінку часових рядів навіть при наявності в цих рядах фазових переходів.

3. Сформульовані попередні рекомендації щодо аналізу даних та наведено практичну методика обробки даних гідрометеорологічних спостережень.

4. Прогнозування за даним методом може здійснюватися на достатньо довгий проміжок часу (наприклад 20 років). Результати прогнозу можуть бути використані при проектуванні реконструкції автомобільних доріг, плануванні ремонтних робіт, оцінці гідрологічних ситуацій на тривалу перспективу тощо.

Література

1. Клімат України / Ліпінського В.М., Дячука В.А., Бабіченко В.М. // – К.: Вид-во Раєвського. – 2003. – С. 343.
2. Стихійні метеорологічні явища на території України за останнє двадцятиріччя (1986-2005 р.) / Ліпінського В.М., Осадчого В.І., Бабіченко В.М. // – К.: Ніка-Центр. – 2006. – С. 312.
3. Гірські автомобільні дороги Українських Карпат / Герасимчука В.О. // –Ужгород, “Закарпаття”. – 2000. – С. 269.
4. Водні стихії. Карпатські повені. Статистика, причини, регулювання / Ромащенко М., Савчук Д. // – К.: Аграрна наука. – 2002. – С. 304.
5. Наукові методи оцінки гідрологічної ситуації на мостових переходах в гірських умовах Карпат / Бєлятинський А.О. // – К.: Вид-во ЛДЛ. – 2010. – С. 127.
6. Дослідження циклічності погодно-кліматичних умов України в зв’язку з прогнозуванням впливу небезпечних природних явищ на стан автомобільних доріг / Литвиненко А.С. // Зб. «Дороги і мости», вип. 5. –К.: Держдор НДІ. 2006. С. 74-89.
7. Дослідження особливостей часового ряду кліматичних даних методом рекуррентних графіків / Петрович В.В., Артеменко В.А. // Зб. «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво», вип. 78. –К.: НТУ. 2010. С. 92-107.
8. Прогнозування погодно -кліматичних умов методом спектрального аналізу / Петрович В.В., Артеменко В.А. //Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, вип. 79. – К.: Вид-во НТУ. 2010. С. 37-49.
9. Разностные уравнения и их приложения / Шарковский А.Н., Майстренко Ю.Л., Романенко Е.Ю. // – К.: Наукова думка. – 1986. – С. 280.
10. MATLAB 7 / Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнова Е.Н. // – СПб.: ”БХВ-Петербург”. – 2005. – С. 1104.
11. Застосування апарата нелінійної динаміки для аналізу часових рядів гідрометеорологічної інформації / Петрович В.В., Артеменко В.А. // Зб. «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво», вип. 80. – К.: НТУ. – 2011. – С. 120-139.
12. Порівняльна оцінка виникнення фазових переходів в часових рядах температури / Петрович В.В., Артеменко В.А. // Зб. Дороги і мости, вип. 12. – К.: Держдор НДІ.– 2010. – С. 150-158.