

ПРО ПРОГНОЗОВАНІСТЬ ГІДРОЛОГІЧНИХ ЧАСОВИХ РЯДІВ

ABOUT OF FORECASTING POSSIBILITY OF HYDROLOGICAL TIME SERIES



*Артеменко Владислав Андрійович, UT5UDJ, магістр екології, Український гідрометеорологічний інститут Державної служби України з надзвичайних ситуацій та Національної академії наук України, науковий співробітник відділу гідрохімії, e-mail: [artemenko@uhmi.org.ua](mailto:artemenko@uhmi.org.ua), тел. 380936011250, Україна, 03028, м. Київ, просп. Науки 37, к.34.*

<https://orcid.org/0000-0003-0536-5415>



*Петровиц Володимир Васильович, кандидат технічних наук, професор, старший науковий співробітник, професор кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету. e-mail: [petrovichvv60@ukr.net](mailto:petrovichvv60@ukr.net), тел. +380442807338, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 138.*

<https://orcid.org/0000-0003-0422-2535>

**Анотація.** Пропонується для прогнозування природних (у тому числі гідрологічних) часових рядів використовувати підхід, що заснований на концепції детермінізму у своєму втілені у вигляді парадигми динамічного хаосу.

На базі аналізу часового ряду виявляють приховані закономірності у вихідних даних, які далі використовують для здійснення процесу прогнозування.

Враховуючи, що гідрологічні часові ряди мають специфічну хаотичну поведінку, ці ряди можливо спрогнозувати лише на обмежену кількість кроків вперед.

Для таких рядів існує певна межа – горизонт прогнозованості (передбачуваності).

Реальний прогноз можливий лише у разі, якщо не виходити за горизонт прогнозованості.

Метою роботи є розробка процедури дослідження гідрологічного часового ряду на прогнозованість.

У якості вихідних використані середньодобові дані витрат води крупної рівнинної річки України довжиною 4\*365 точок.

Можливе також усереднення ряду витрат води для 5 або більше точок відповідно.

Для прогнозування гідрологічного часового ряду застосовували розроблену авторами модифікацію метода локальної апроксимації.

Горизонт прогнозованості гідрологічного часового ряду визначався через лінійний коефіцієнт кореляції: на скільки точок вперед можливо максимально спрогнозувати даний ряд, якщо лінійний коефіцієнт кореляції між реальними та спрогнозованими значеннями буде знаходитись в межах [0.7 ... 1.0].

Був визначений горизонт прогнозованості реального часового гідрологічного ряду в залежності від параметра *DIM* (розмірності фазового простору, який реконструюється).

Одержані в результаті дослідження дані свідчать про істотну детермінованість в поведінці ряду з точки зору його прогнозованості (даний ряд прогнозується як мінімум на 15 точок (кроків) та максимум на 22 точки вперед).

Розроблено програмне забезпечення, за допомогою якого досліджувались гідрологічні та гідрохімічні ряди на прогнозованість.

Як показали результати дослідження, використання метода локальної апроксимації нульового порядку більш ефективно у порівнянні із іншими методами гідрологічного прогнозування, де реальний прогноз здійснюється на одну, максимум дві точки вперед.

**Ключові слова:** гідрологічний часовий ряд, прогнозування гідрологічного ряду, метод локальної апроксимації, горизонт прогнозованості.

Річка здається величезною для того, хто не  
бачив іншої, більш широкої.  
*Лукрецій Кар. "Про природу речей"*

### Вступ

При проектуванні мостових переходів та гідротехнічних дорожніх споруд обов'язково використовують прогнозні рішення щодо майбутнього стану водного об'єкта.

Раніше при прогнозуванні гідрологічних характеристик домінували імовірісно-статистичні методи розрахунку.

На даний час однозначно встановлено, що результати прогнозування процесів на основі методів теорії ймовірностей не підтверджуються практикою внаслідок високих помилок та малої завчасності прогнозів.

Розробки на основі важко одержуваних вихідних даних для систем диференціальних або різницевих рівнянь, та далі знаходження коефіцієнтів для побудови відповідних моделей прогнозування також не знайшли широкого застосування у гідрологічних розрахунках.

Найчастіше продовжується використання методів прогнозування, які не відповідають запитам практики.

Нові підходи до прогнозування природних (зокрема гідрологічних) процесів, що засновані на концепції детермінізму у своєму втіленні у вигляді парадигми динамічного хаосу, виявилися найбільш успішними.

В цьому випадку для прогнозу часового ряду необхідний тільки сам часовий ряд, де важливий порядок слідування складових цього ряду, і нічого більше!

Справа в тому, що детермінований часовий ряд породжується за певним законом: конкретне значення у ряді визначається декількома попередніми значеннями.

На основі аналізу часового ряду виявляють приховані закономірності у вихідних даних, які згодом використовують для здійснення процесу прогнозування.

Однак якщо це "випадковий" часовий ряд, про його прогнозування взагалі річ йти не може - "випадковий" часовий ряд не прогнозується на жодну точку вперед.

Природні часові ряди не є "випадковими" рядами. Як не є рядами повністю детермінованими.

Згідно із сучасними уявленнями, такі ряди слід відносити до рядів "невизначених".

Математична модель зазвичай може містити або детерміновані, або "випадкові" величини.

Мистецтво побудови математичної моделі у даному випадку полягає у разі у тому, щоб "невизначені" величини, із якими доводиться мати справу, нехай наближено, але представлялися через величини детерміновані [1].

Як відомо, гідрологічні часові ряди мають специфічну "хаотичну" поведінку [2-6].

Такі ряди, як і будь-які детерміновано-хаотичні ряди, можливо спрогнозувати лише на обмежену кількість кроків уперед, оскільки для таких рядів існує певна межа – так званий горизонт прогнозованості (передбачуваності).

Тобто реальний прогноз можливий лише у разі, якщо не виходити за цей горизонт прогнозованості [7].

Це пояснюється високою "чутливістю" гідрологічних часових рядів до наявних відмінностей у початкових умовах (детерміновано-хаотичні ряди мають позитивний старший показник Ляпунова).

**Мета роботи** – розробка процедури дослідження гідрологічного часового ряду на прогнозованість.

#### **Задачі:**

1. Визначити особливості прогнозування природних часових рядів методом локальної апроксимації;

2. Виконати прогнозування гідрологічного часового ряду за допомогою модифікованого *LA*-метода;
3. Встановити характер можливих обмежень при використанні метода *LA* у разі прогнозування річного стоку.

#### Вихідні дані

Як вихідні, використовувалися середньодобові дані щодо витрат води  $Q$ , м<sup>3</sup>/с, крупної рівнинної річки України.

Для простоти організації обчислень дані за 29 лютого із часових рядів видалялися.

Відомо, що зі збільшенням довжини часового ряду його горизонт прогнозованості зростає.

У той же час якісні співвідношення завжди залишаються практично сталими при переході від довжини ряду, наприклад, в  $4 \cdot 365$  точок, до значно більшої його довжини ( $10 \cdot 365$  точок, і навіть  $20 \cdot 365$  точок).

Однак зростання довжини ряду природньо призводить до помітного збільшення часу розрахунків.

З іншого боку, для дуже коротких часових гідрологічних рядів може бути складно знайти досить прийнятний аналог (тобто здійснити прогноз необхідної якості).

Зважаючи на це, у роботі розглядали гідрологічні часові ряди довжиною  $4 \cdot 365$  точок, що відповідало чотирьом рокам спостережень.

#### Особливості прогнозування гідрологічного часового ряду методом локальної апроксимації.

На даний час відомий один із найпростіших, але в той же час ефективний, метод прогнозування часових рядів – метод локальної апроксимації (метод *LA*).

Існує безліч модифікацій методу *LA*, об'єднаних загальною ідеєю – близькі початкові умови породжують і близькі результати.

Використовується даний метод в гідрологічному прогнозуванні [8, 9].

У цьому дослідженні як інструмент прогнозування застосовувалася розроблена авторами модифікація методу *LA* нульового порядку [10].

Як показав попередній аналіз, ряд середньодобових витрат води має вид, характерний для потокової динамічної системи.

При формуванні траєкторної матриці використовували параметри *DIM* (розмірність реконструйованого фазового простору) та *TAU* (часова затримка, необхідна для формування траєкторної матриці).

У даному випадку значення *DIM* – це число стовпців траєкторної матриці.

Передбачалося, що *DIM* – мірна система відновлюється за одновимірним часовим рядом згідно теореми Такенса.

Кількість аналогів було прийнято рівним  $NA=1$ .

Зазвичай параметри *DIM* та *TAU* визначаються шляхом попереднього аналізу вихідного часового ряду за допомогою спеціальних процедур, і лише потім формується траєкторна матриця. Однак оскільки автори планували дати лише специфікацію процедури дослідження часового ряду на прогнозованість, подальшу інформацію подавали наступним чином.

Задавалися величиною *TAU=1*, що дозволяло сформувати траєкторну матрицю із наступними та поступовими значеннями часового ряду.

При прогнозуванні використали принцип “прямого прогнозування”, де прогноз виконується “одним стрибком” на стільки точок вперед, на скільки це буде потрібно.

На відміну від цього ітеративний прогноз вимагає спочатку виконання прогнозу на одну точку вперед, потім ще на одну точку, і так далі. Тобто необхідно у цьому разі спрогнозувати всі попередні (проміжні) точки для досягнення мети прогнозування.

Слід також врахувати, що у реальній процедурі повинна перевірятись умова на відповідність розміру траєкторної матриці та максимальної кількості кроків вперед прогнозу, щоб не було виходу за границі матриці.

Зважаючи на те, що для природних (у тому числі гідрологічних) рядів найкращий аналог – це звичайно найближча строка траєкторної матриці, нове прогнозне значення може дорівнювати значенню попередньому.

Крім того, буде неможливо у цьому випадку виконати прогноз більш ніж на одну точку.

Тому у реальній процедурі між кінцевою строкою та тією областю траєкторної матриці, де будемо шукати аналог, здійснювати зазор в *DIM*-строк.

Реальна процедура виконана так, що при некоректному значенні параметрів робота програми припиняється. В результаті роботи програми одержували прогнозні значення витрат річкової води  $Q$ , м<sup>3</sup>/с.

#### Визначення горизонту прогнозованості гідрологічного часового ряду

Горизонт прогнозованості (передбачуваності) FH ряду (Forecasting Horizon) визначався через лінійний коефіцієнт кореляції.

Тобто, на скільки точок вперед можливо максимально спрогнозувати даний ряд, якщо лінійний коефіцієнт кореляції *CC* між реальними та прогнозними значеннями буде знаходитись в межах [0,7 ... 1,0].

Слід зазначити, що для оцінки якості прогнозу лінійний коефіцієнт кореляції не можна визнати найкращим вибором. Більш правильним буде використання непараметричного коефіцієнта кореляції [11].

Проте використання лінійного коефіцієнта кореляції дозволило зіставляти отримані результати з результатами досліджень інших авторів по цьому питанню.

Деякі графіки прогнозованості одного із вихідних гідрологічних часових рядів представлені на рис. 1 та рис. 2.

Значення *AHEAD* – це загальна кількість точок, на які виконувався прогноз.

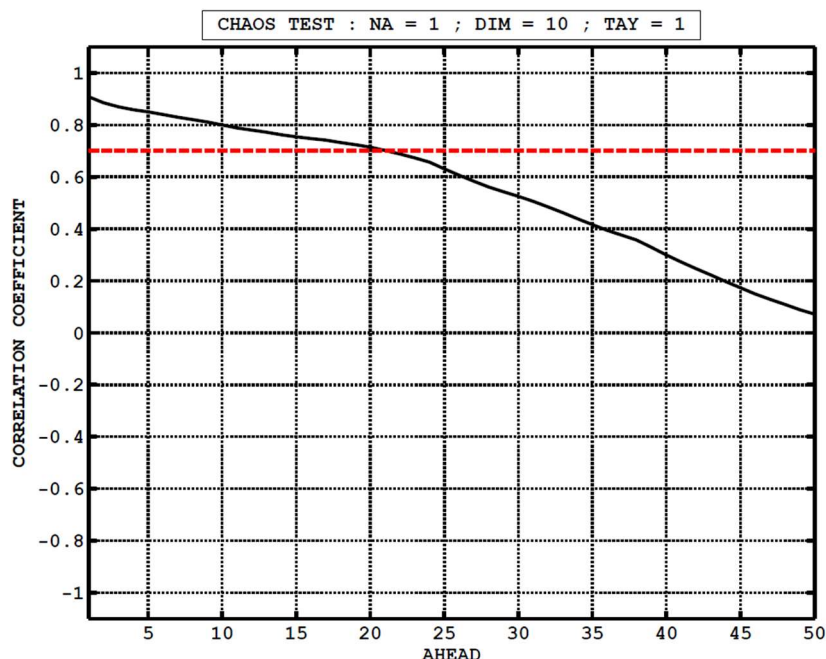


Рисунок 1 – Графік прогнозованості гідрологічного часового ряду при значенні величини *DIM=10*.

Figure 1 – Graph of forecasting possibility of hydrological time series for *DIM=10*.

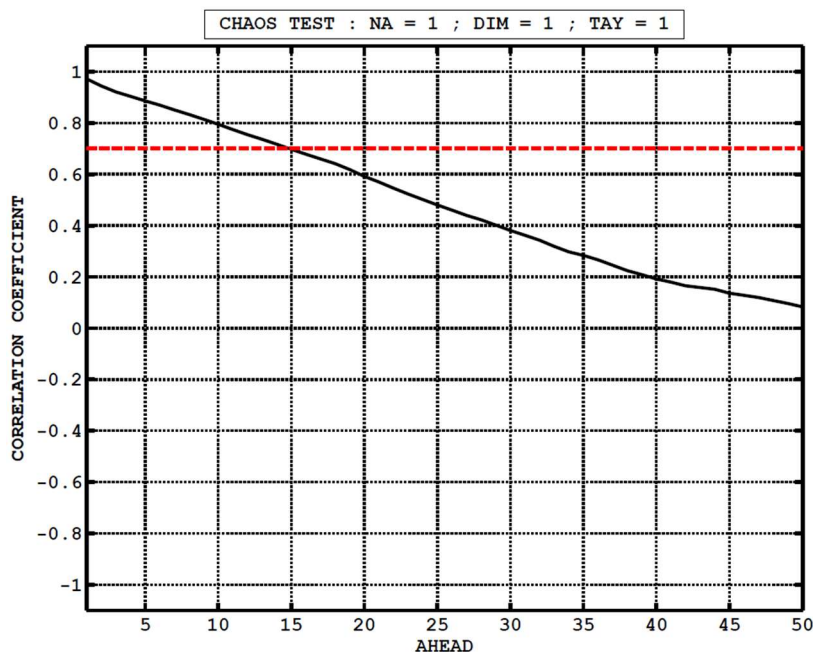


Рисунок 2 – Графік прогнозованості гідрологічного часового ряду при значенні величини  $DIM=1$ .  
Figure 2 – Graph of forecasting possibility of hydrological time series for  $DIM=1$ .

Таблиця 1 – Значення величини горизонту прогнозованості  $FH$  залежно від параметра  $DIM$  для часового гідрологічного ряду при фіксованих параметрах  $NA=1$  та  $TAY=1$ .

Table 1 – The value of the predictability horizon  $FH$  depending on parameter  $DIM$  for the time hydrological series with fixed parameters  $NA=1, TAY=1$ .

Параметр $DIM$	Значення величини $FH$
1	15
5	18
10	22
15	19
20	17
25	17
30	16

У таблиці 1 наведено значення горизонту прогнозованості залежно від параметра  $DIM$ .

В даному випадку можна говорити про істотну детермінованість у поведінці гідрологічного ряду з точки зору його прогнозованості, оскільки ряд прогнозується як мінімум на 15 точок вперед (при параметрі  $DIM=1$ ) та максимум на 22 точки (при  $DIM=10$ ).

При цьому можна відповідно розглядати ряд витрат (точок), усереднених на 5 і більше діб [12].

В результаті проведеної роботи розроблено програмне забезпечення (комплекс програм), за допомогою якого досліджуються різні гідрологічні ряди на прогнозованість.

Процедури написані мовою програмування **NATLAB** таким чином, що можуть виконуватися також у **FREEMAT** та **OCTAVE**.

Як показали результати дослідження, метод локальної апроксимації набагато ефективніший за інші методи гідрологічного прогнозування, де реальний (промисловий) прогноз здійснюється зазвичай на одну, максимум дві точки вперед.

Відзначимо також, що загальні положення та підхід до оцінки прогнозованості, запропоновані у статті, виконуються і для більшості інших природних часових рядів.

### Висновки

1. З точки зору практики вводяться поняття “випадкового” та “детермінованого” часового ряду. “Випадковий” часовий ряд не прогнозується на жодну точку вперед, тоді як ряд “детермінований” прогнозується мінімум на одну точку при певних параметрах прогнозування.

2. Розроблено методику оцінки природних часових рядів на прогнозованість. Величина (ступінь) прогнозованості часового ряду визначається через значення горизонту прогнозованості.

3. Виконане дослідження гідрологічних часових рядів на прогнозованість. Встановлено, що у своїй більшості гідрологічні часові ряди – це ряди детерміновані і при цьому достатньо добре прогнозовані.

#### **Напрямок подальших досліджень**

Наступні дослідження по даному питанню пов'язані із розробкою нових ефективних методів нелінійного прогнозування гідрологічних процесів.

Розробляється також метод прогнозування, що заснований на використанні радіальних базисних функцій (не плутати із відповідними нейронними сітками!).

Вивчаються практичні можливості застосування “символьної” регресії та “вирішувальних дерев” у практиці гідрологічних розрахунків.

#### **Перелік посилань**

1. Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов: Учеб. пособие. М.: Финансы и статистика, 2003. 416 с.

2. Jayawardena A.W., Lai F. Chaos in hydrological time series. *Extreme Hydrological Events: Precipitation, Floods and Droughts*. – Proceedings of the Yokohama Symposium, July 1993. IAHS, Publ. №213. 1993. P. 59-66.

3. Koutsoyiannis D. On the quest for chaotic attractors in hydrological processes. *Hydrological Sciences*, 51(6). Dec. 2006. P. 1065-1091.

4. Sivakumar B., Berndtsson R., Olsson J., Jinno K., Kawamura A. Dynamics of monthly rainfall-runoff process at the Gota basin: A search for chaos. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4(3). 2000. P. 407-417.

5. Jayawardena A.W., Li W.K., Xu P. Neighborhood selection for local modelling and prediction of hydrological time series. *Journal of Hydrology*, 258. 2002. P. 40-57.

6. Khan S., Ganguly A.R., Saigal S. Detection and predictive modeling of chaos in finite hydrological time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 12. 2005. P. 41-53.

7. Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. Современные проблемы нелинейной динамики. М., Эдиториал УРСС, 2000. 336 с.

8. Jayawardena A.W. Runoff forecasting using a local approximation method. *Destructive Water: Water-Caused Natural Disasters, their Abatement and Control*. Proceedings of the Conference held at Anaheim, California, June 1996. IAHS, Publ. №239. 1997. P. 167-171.

9. Юшкина О.А. Анализ и прогноз временной изменчивости речного стока методами нелинейной динамики: автореф. дис. ... канд. географ. наук. Иркутск, 2009. 20 с.

10. Артеменко В.А., Петрович В.В. Прогнозування нерегулярних часових рядів методом локальної апроксимації. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Київ, 2012. Вип. 86. С. 176-195.

11. Артеменко В.А., Петрович В.В. Непараметричний показник варіабельності гідроекологічних часових рядів. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Київ, 2021. Вип. 109. С. 103-108.

12. Артёменко В.А., Петрович В.В. Повышение качества прогнозирования гидрологических временных рядов. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Київ, 2014. Вип. 92. С. 114-127.

#### **ABOUT OF FORECASTING POSSIBILITY OF HYDROLOGICAL TIME SERIES**

**Artemenko Vladislav A.**, *UTSUDJ*, Master of Ecology, Ukrainian Hydrometeorological Institute, State Service on Emergencies of Ukraine and National Academy of Science of Ukraine, Hydrochemical Research, Scientific Employee, e-mail: [artemenko@uhmi.org.ua](mailto:artemenko@uhmi.org.ua), tel. 380936011250, Nauki avenue, 37, Kyiv, Ukraine, 03028, room 34, <https://orcid.org/0000-0003-0536-5415>

**Petrovych Volodymyr V.**, Candidate of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher, Professor of the Transportation Construction and Property Management Department, National Transport University. e-mail: [petrovichvv60@ukr.net](mailto:petrovichvv60@ukr.net), tel. +380442807338, Ukraine, 01010, Kyiv, street M. Omelyanovicha-Pavlenka, 1, room 138, <https://orcid.org/0000-0003-0422-2535>

**Abstract.** It is offered forecast the natural time series (hydrological time series) by methods the deterministic chaotic dynamic.

At analysis of the time series reveal the hidden regularities at raw data's.

Hereinafter revealed regularities use for realization of the forecast of input data.

Hydrological time series either as chaotical time series possible forecast only at determined number step onward.

For hydrological time series exists the limit of forecasting (forecasting horizon).

The identical prediction possible unless come behind of the forecasting horizon.

The aim of the work there is design of the procedure the investigations of the natural time series on possibility of the forecasting.

As raw data's were used the mean day data of consumption for the large flat river of the Ukraine (length is 4\*365 points).

For forecasting of the natural time series it was used designed an autors modification of the method of Local Approximation.

The forecasting horizon of time series was defined by means of factor the linear correlation (on how much points onward (maximum) possible forecast the time series for conservation of the factor the correlation within the range of 0.7 ... 1.0).

The explored dependency of the forecasting horizon from parameter DIM (Dimensionality Reconstructed the phase space).

The results of the research say for essential determinism of time series (hydrological) – the time series is forecasted on 15 ... 22 points onward.

Software was designed for investigations of the natural time series (hydrological and hydrochemistry) for forecasting (to find forecasting horizon).

The called on investigation has shown that the method of Local Approximation more efficient than classical methods the forecast (for classical methods the adequate forecast possible only on 1 ... 2 points onward).

**Key words:** hydrological time series, forecasting water consumption, method Local Approximation forecast horizon.

#### References

1. Lukashin Y.P. Adaptivnyye metody kratkosrochnogo prognozirovaniya vremennykh ryadov: ucheb. posobiye. M.: Finansy i statistika, 2003. 416 s. [in Russian].

2. Jayawardena A.W., Lai F. Chaos in hydrological time series. Extreme Hydrological Events: Precipitation, Floods and Droughis. Proceedings of the Yokohama Symposium, July 1993. IAHS, Publ. №213. 1993. P. 59-66. [in English].

3. Koutsoyiannis D. On the guest for chaotic attractors in hydrological processes. Hydrological Sciences, 51(6). Dec. 2006. P. 1065-1091. [in English].

4. Sivakumar B., Berndtsson R., Olsson J., Jinno K., Kawamura A. Dynamics of monthly rainfall-runoff process at the Gota basin: A search for chaos. Hydrology and Earth System Sciences, 4(3). 2000. P. 407-417. [in English].

5. Jayawardena A.W., Li W.K., Xu P. Neighbourhood selection for local modelling and prediction of hydrological time series. Journal of Hydrology, 258. 2002. P. 40-57. [in English].

6. Khan S., Ganguly A.R., Saigal S. Detection and predictive modeling of chaos in finite hydrological time series. Nonlinear Processes in Geophysics, 12. 2005. P. 41-53. [in English].

7. Malinetskiy G.G., Potapov A.B. Sovremennyye problemy nelineynoy dinamiki. M.: Editorial URSS, 2000. 336 s. [in Russian].

8. Jayawardena A.W. Runoff forecasting using a local approximation method. Destructive Water: Water-Caused Natural Disasters, their Abatement and Control. Proceedings of the Conference held at Anaheim, California, June 1996. IAHS, Publ. №239. 1997. P. 167-171. [in English].

9. Yushkina O.A. Analiz i prognoz vremennoy izmenchivosti rechnogo stoka metodami nelineynoy dinamiki: avtoref. diss. ... kand. geograf. nauk. Irkutsk, 2009. 20 s. [in Russian].

10. Artemenko V.A., Petrovych V.V. Prohnozuvannya nerehulyarnykh chasovykh ryadiv metodom lokalnoyi aproksymatsiyi. Avtomobilni dorohy i dorozhnye budivnytstvo. Kyiv, 2012. Vyp. 86. S. 176-195. [in Ukrainian].

11. Artemenko V.A., Petrovych V.V. Neparometrychnyy pokaznyk variabel'nosti hydroekolohichnykh chasovykh ryadiv. Avtomobilni dorohy i dorozhnye budivnytstvo. Kyiv, 2021. Vyp. 109. S. 103-108. [in Ukrainian].

12. Artemenko V.A., Petrovych V.V. Povysheniye kachestva prognozirovaniya hydrologicheskikh vremennykh ryadov. Avtomobilni dorohy i dorozhnye budivnytstvo. Kyiv, 2014. Vyp. 92. S. 114-127. [in Russian].