

УДК 556.5 (282.247.32)

РЕТРОСПЕКТИВНИЙ АНАЛІЗ ТРАНСФОРМАЦІЇ ТА ПРОГНОЗ СТОКУ РІЧКИ ДНІПРО

В.І. Пічура

кандидат сільськогосподарських наук, докторант
доцент кафедри екології та сталого розвитку

ДВНЗ «Херсонський державний аграрний університет»

Представлений ретроспективний аналіз та прогноз стоку річки Дніпро із застосуванням багатомірної статистики та адаптивних методів нелінійного аналізу часових рядів. Із застосуванням середньоквадратичного відхилення та вейвлет-аналізу виявлено аномальні прояви і визначено основні періоди трансформації водного режиму річки за 190 років (1818–2008 рр.). В результаті нелінійного прогнозування визначено, що при збереженні тенденції формування водного режиму р. Дніпро. Із імовірністю на 90% відбуватиметься незначне, але стабільне тренд-циклічне зменшення середньорічного стоку на $1,6 \text{ м}^3/\text{с}$ за рік і становитиме до 2040 р. $1120 \pm 270 \text{ м}^3/\text{с}$.

Ключові слова: водний режим, річковий стік, річка Дніпро, ретроспективний аналіз, багатомірна статистика, вейвлет-аналіз, метод Хольта-Уінтерса, прогноз.

.....

Вивчення закономірностей формування та змін гідрологічного режиму і стоку річок є одним з основних завдань гідрології суші. Природа багаторічних змін водного режиму річок, особливо в умовах нестабільного клімату й посилення впливів антропогенних чинників, досліджена недостатньо. Інтенсивне використання водних ресурсів і перетворення природних ландшафтів під впливом господарської діяльності людини призвело до змін природного водного балансу річкових водозборів, що суттєво порушили їхній гідрологічний режим, який визначається змінами водності та динаміки річкового стоку. Водний режим багатьох річок порушений господарською діяльністю в руслах (лісосплавні греблі, дрібні ГЕС, штучне регулювання та перерозподіл стоку тощо) і на водозборі (розораність земель, вирубування лісів, гідромеліорація тощо) [1]. Протягом багатьох років процес формування річкового стоку, який визначається закономірностями багаторічних коливань і сезонного ходу, розглядався як результат дії великої кількості чинників, що визначають переважно стохастичний підхід до вивчення цих закономірностей [2, 3]. Однак результати інших досліджень [4–9] свідчать про наявність детермінованого хаосу в багаторічних рядах стоку річок, який можна визначити, застосувавши взаємодоповнюючі лінійні, нелінійні та спектральні методи багатомірної статистики й аналізу часових рядів. За цими методами можна отримати детальне уявлення про механізми формування стоку, а також їх можна використати на практиці під час вирішення завдань ретроспективного аналізу, інтерполяції та екстраполяції часових гідрологічних рядів.

Ретроспективний аналіз динаміки стоку — необхідний елемент моделювання та детального вивчення зміни стану природних і природно-технічних систем, пов'язаних з використанням водних ресурсів. Зміни водності впливають на технічні та економічні умови функціонування господарських об'єктів і комплексів, визначають потенційні витрати на захист від небезпечних гідрологічних процесів, ступінь комфортності життя і, нарешті, здоров'я та добробут населення. Аналіз і прогноз стоку розглядається в багатьох публікаціях як міждисциплінарне завдання, задовільне рішення якого передбачає врахування великої кількості чинників, складність і неоднозначність їх взаємодії. Виявлення відмінностей у гідрологічному режимі в часі дає змогу виділити й детально вивчити періоди формування стоку, визначити початок його трансформації, що забезпечує можливість зрозуміти вплив ретроспективних причин на формування сучасних тенденцій динаміки гідрологічних характеристик.

Внаслідок масштабного гідробудівництва (1927–1976 рр.) водний режим на великих долинно-річкових ділянках Дніпра штучно був трансформований з річкового в озерний, що призвело до різкого уповільнення циркуляції водних мас і появи великих зон застою. Зі створенням водосховищ Дніпровського каскаду істотно збільшився водоресурсний потенціал України, але це спричинило порушення водного стоку, евтрофікацію вод, значне підтоплення прибережних територій, абразію, підняття рівня ґрунтових вод, збільшення обсягу підземного стоку, підвищення рівня забрудненості підземних вод, порушення ґрунтового живлення річки та інших процесів. Накопичення мулу призвело

до порушення водообміну між поверхневими і підземними водами. Випаровування з поверхні водосховищ досягає до $4,5 \text{ км}^3/\text{рік}$.

Антропогенна трансформація гідрологічного режиму та істотне скорочення стоку є причиною деградації водної екосистеми р. Дніпро. Виявити тенденцію зміни стоку річки надто складно через недосконалість методів вимірювання, просторове варіювання параметрів, стохастичну природу зміни та інші причини.

У зв'язку з цим аналіз фактичних даних різними вченими [10, 11] дає неоднозначні та суперечливі результати: в одному випадку гадають, що стік збільшується [12, 13], в іншому ніяких тенденцій не виявлено [14] і вважають динаміку хаотичною [15], в третьому випадку дослідники обґрунтовували наявність від'ємного тренду [16, 17]. Неоднозначність результатів здебільшого залежала від нерівномірності періодів спостережень і різноманітності застосовуваних методів статистичного оброблення даних. Причини змін стоку багато вчених вбачають у циклах сонячної активності та зміні клімату. Більш очевидною причиною формування динаміки стоку є будівництво каскаду водосховищ, яке призвело до порушення природного живлення річки Дніпро.

Тому ми поставили за мету провести ретроспективний аналіз, установити основні періоди трансформації стоку Дніпра за 1818–2008 рр. та здійснити проноз імовірності його зміни до 2040 р., застосувавши багатовимірну статистику та адаптивні методи нелінійного прогнозування.

Дослідження зміни стоку р. Дніпро ($Q \text{ м}^3/\text{с}$) здійснені за 190 років (1818–2008 рр.): для 1818–1975 рр. першоджерелом були дані Г.І. Швеця [18], для 1976–2008 рр. — фактичні спостереження Херсонської гідробіологічної станції НААН України [19]. Ретроспективний аналіз зміни стоку здійснювався із застосуванням багатовимірної статистика та методів аналізу часових рядів. Для виявлення типу функції кривої щільності розподілу значення середньорічного стоку було використано їхні варіації: normal, beta, exponential, extreme, gamma, geometric, laplace, logistic, lognormal, poisson, rayleigh, weibull. Це дало можливість визначити, що процеси зміни динаміки стоку в часі підлягають закону одноmodalного lognormal розподілу, що свідчить про підпорядкування вхідних даних нормальному розподілу при $\text{Ln}(Q)$, що забезпечило можливість привести нестационарний процес до стаціонарного для подальшого детального дослідження складових динамічних процесів формування водного режиму:

$$Q_t = T_t + S_t + C_t + \varepsilon_t, \quad (1)$$

де Q_t — вхідні дані динаміки стоку; T_t — відгук трендової складової; S_t — відгук сезонної складової; C_t — відгук циклічної складової; ε_{t-n} — відгук імовірнісної стохастичної або нерегульованої компоненти зміни стоку.

Водний режим р. Дніпро являє собою складний динамічний процес, який визначений суперпозицією високочастотних (ВЧ) і низькочастотних (НЧ) гармонік різної періодичності з локальними та глобальними часовими особливостями, залежними від геологічних, кліматичних та антропогенних умов. Тому цей складний процес було досліджено за допомогою вейвлет-аналізу [20, 21] для розкладання вихідного ряду на ВЧ (апроксимуючі) і НЧ (детелізуючі) сигнали, а також спектрального фур'є-аналізу з метою визначення основних гармонійних (циклічних) складових динаміки стоку річки шляхом виділення синусоїдальних компонент на різних частотах.

Відносно базисного Вейвлета інтегральне Вейвлет-перетворення часового ряду $f(t)$, заданого на інтервалі $-\infty \leq t \leq +\infty$, визначається як:

$$(W_\phi f)(b, a) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\phi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt, \quad (2)$$

де $a, b \in R$; $a \neq 0$; $\phi(t)$ — функція вейвлет-перетворення; a — часовий масштаб, b — часове зміщення.

За допомогою безперервного перетворення сигнал $\varphi(t)$ з двовимірної площини переводиться в тривимірний простір з координатами: час (b), масштаб (a) і амплітуда (c). При цьому сигнал розкладається на гармоніки з частотами, що відповідають певним масштабам (a).

Для прогнозування змін стоку р. Дніпра використано адаптивний метод аналізу часових рядів Хольта-Уінтерса (трипараметричного експоненціального згладжування) [22–24], який враховує дані передісторії часового формування, циклічну й трендову складові зміни водного режиму. Цей метод є одним з найнадійніших і широко використовуваних у практиці прогнозування.

Для аналізу, моделювання та прогнозування динаміки річкового стоку використано ліцензійні програмні продукти STATISTICA Advanced + QC for Windows v.10 Ru і MathWorks MATLAB 7.9 R2009b.

Аналіз часових рядів зміни стоку Дніпра за період функціонування каскаду водосховищ з урахуванням зменшення безповоротного водоспоживання за останні 40 років свідчить про постійне зменшення середньорічних обсягів стоку ($Q \text{ м}^3/\text{с}$) річки (рис. 1), що спровокувало підвищення мінералізації вод у її низині на 27,4% (від $0,303 \text{ г}/\text{дм}^3$ в районі Києва до

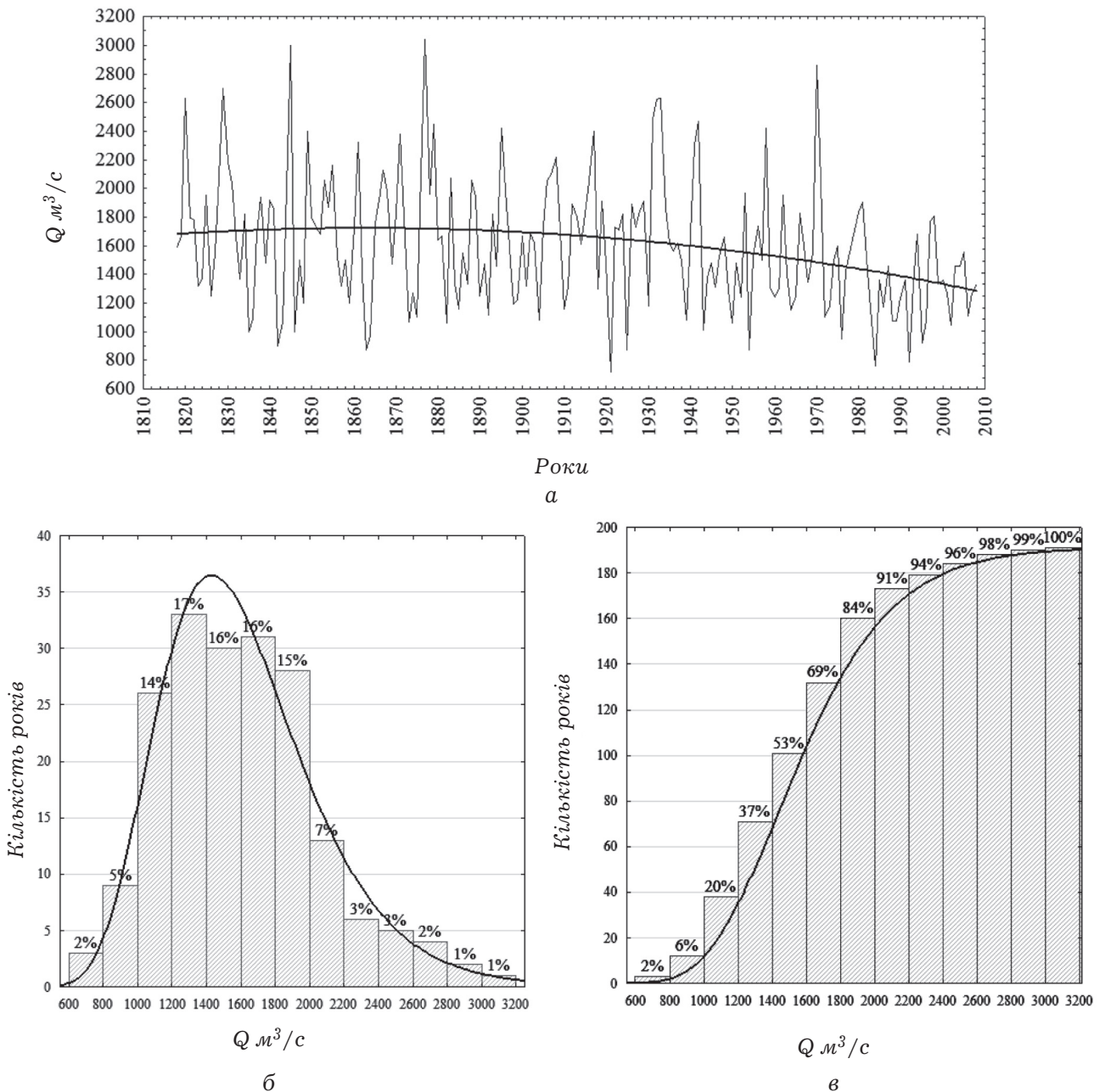


Рис. 1. Середньорічні зміни стоку ($Q \text{ м}^3/\text{с}$) річки Дніпро за 1818–2008 рр.: а) — динаміка стоку; б) — графік розподілу; в) — накопичувана частота ймовірності зміни стоку

0,386 г/дм³ у районі Херсона) та деградацію її екосистеми [25, 26].

Незважаючи на стабільні варіаційні процеси гідрохімічного режиму, відзначено наявність незначної від'ємної трендової складової в усіх показниках хімічного складу (мінералізації та основних йонів) води в межах 1,4–12,2%. Результати прогнозування гідрохімічного режиму пониззя Дніпра показали, що при існуючих умовах його формування відбуватиметься незначне, але стабільне погіршення всіх показників хімічного складу води [26].

Формування водного режиму розподіляють на три періоди (рис. 2) [19]: I період — природні умови формування, або до зарегулювання стоку (1818–1946 рр.); II період — антропогенна трансформація стоку, або становлення нових умов стоку (створення каскаду Дніпровських водосховищ — 1947–1976 рр.); III період — антропогенно-регулюючий, або стабілізація нових умов стоку (з 1977 р. по теперішній час).

Багаторічна норма Q за весь ретроспективний період становила 1607 м³/с, значення варіації $Cv = 0,28$, що визначає нестационар-

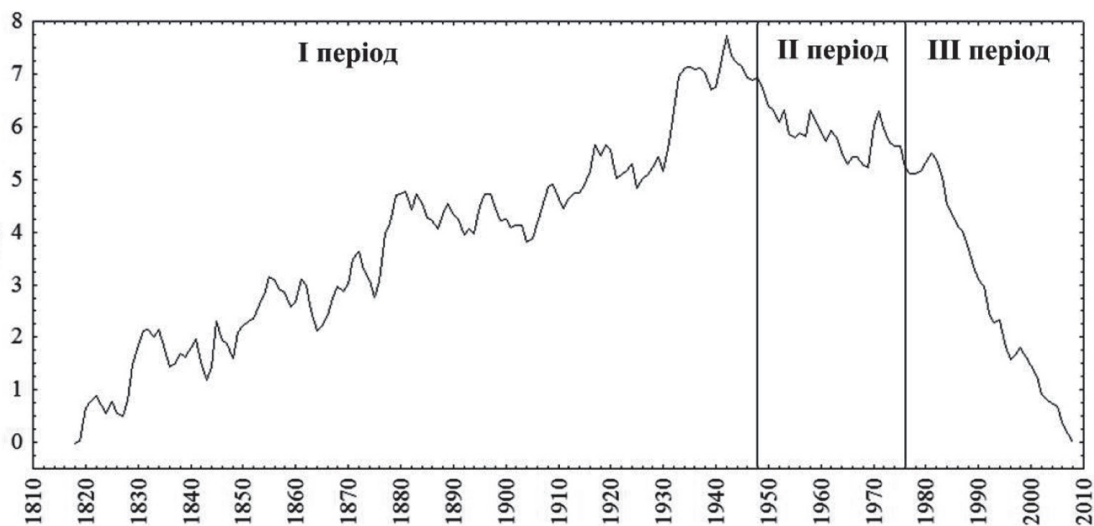


Рис. 2. Інтегральна крива модульних коефіцієнтів (QIK) зміни динаміки стоку р. Дніпро

ність зміни стоку Дніпра; значення ексцесу більше нуля ($E = 0,35$), що вказує на невелику частоту аномальних проявів його змін (відхилень); значення асиметрії ($A = 0,63$) визначає наявність неоднорідності в максимальних значеннях, що можуть бути проявами кліматично аномальних вологих років, у період яких стік річки підвищувався до $3000 \text{ м}^3/\text{с}$. У більшості років (78%) середньорічне значення стоку перебувало в діапазоні $1000\text{--}2000 \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 1, а), в 90% випадків стік Дніпра становив менше ніж $2200 \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 1, б).

Аномальні прояви змін гідрологічних умов визначено за величиною середньоквадратичного відхилення: $Q \geq \pm\sigma$ — сильні аномалії і $Q \geq \pm 2\sigma$ — дуже сильні аномалії, де $\sigma = 451,8 \text{ м}^3/\text{с}$. При нормальному розподілі випадкових величин виконується співвідношення:

$$\begin{cases} p(-\sigma < Q < +\sigma) = 0,696, \\ p(-2\sigma < Q < +2\sigma) = 0,963, \end{cases}$$

де p — ймовірність події, в даному випадку вірогідність неперевикнення граничних значень аномалій середньорічного річкового стоку (Q).

Таким чином, приблизно в 70% випадків абсолютна величина аномалій середньорічного стоку не перевищує значення, тобто за 190-літній період спостерігаються 58 років (30%) із сильними і 7 років (4%) дуже сильними аномаліями гідрологічних умов, які до зарегулювання річки були індикаторами впливу аномальних кліматичних змін, а після створення каскаду Дніпровських водосховищ є негативним наслідком антропогенної трансформації стоку та штучного його регулювання. Сильні й дуже сильні аномалії середньорічного стоку визначено: I період — 40 і 6 років, із них 40% аномально

маловодні; II період — 9 і 1 роки, із них 56% аномально маловодні; III період — 9 років, із них 100% маловодні. Середньорічне значення стоку за три періоди його формування зменшилося в 1,26 раза (із $1692 \pm 458 \text{ м}^3/\text{с}$ до $1345 \pm 293 \text{ м}^3/\text{с}$), середньорічна варіація стоку суттєвих змін не зазнала і становила $0,22\text{--}0,29$. Значні зміни відбулися в перерозподілі стоку — стабільно-варіаційна динаміка водного режиму ($E = 0,12$; $A = 0,42$) в I період змінилася на дестабілізаційні процеси його формування в II періоді ($E = 2,27$; $A = 1,33$) із вираженою від'ємною тренд-циклічною направленістю та відносно неоднорідними антропогенно-зумовленими амплітудами циклічних змін середньорічного значення стоку ($E = -0,42$; $A = 0,02$) в III періоді.

Для детального вивчення сигналу динамічного процесу водного режиму р. Дніпро на різних рівнях декомпозиції, а також визначення основних НЧ і ВЧ гармонік ми застосували вейвлет Майєра. В результаті декомпозиції вихідних даних (Q) з використанням методу компресії глобального порога, енергія НЧ сигналу (A, a) збережена (відновлена) на $\sim 97,8\%$, обнуління вейвлет-коефіцієнтів було незначним — усього $\sim 2,2\%$, що підтверджує ефективність вибору функції вейвлет-перетворення.

Гармоніки в хронологічних даних динаміки стоку з різним рівнем локалізації апроксимовані із застосуванням вейвлет кратномасштабного аналізу. Розкладання хронологічного ряду проводили до рівня виокремлення тренду: $QT = -0,0207t^2 + 1,9075t + 1677,8$. Це забезпечило можливість простежити гармонійні коливання на різних рівнях локалізації з покроковою вейвлет-фільтрацією даних на апроксимуючі (A, a) і деталізуючі сигнали (D, d) (рис. 3, а, б). Вейвлет-декомпозиція має такий вигляд:

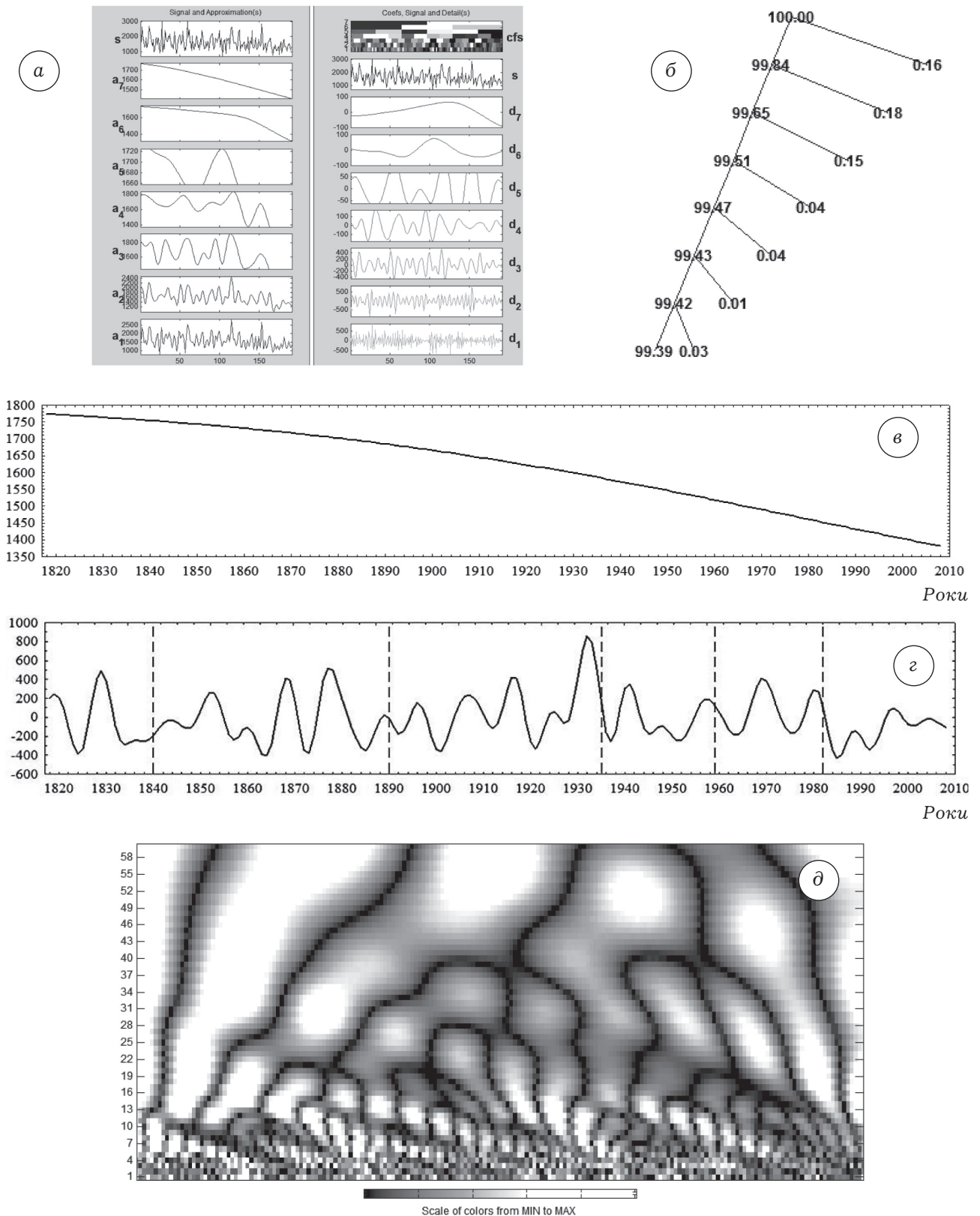
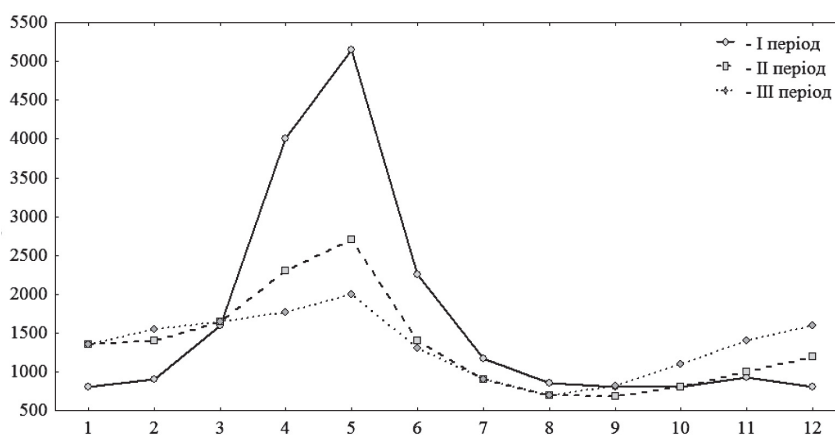


Рис. 3. Вейвлет-декомпозиція зміни стоку р. Дніпро: а) – декомпозиція ряду; б) – вейвлет-дерево енергії збереження (реконструкції) вхідних сигналів; в) – трендова складова; г) – циклічна складова за 12–13 роки; д) – спектрограма вейвлет-коефіцієнтів, $[W(a,b)]$ низькочастотних гармонік змін стоку

$Q(t) = A_7(t) + \sum_{i=1}^7 D_i(t)$. На другому рівні локалізації часового ряду чітко простежуються 12-річні циклічні складові різної амплітуди (рис. 3, з), які визначають локальні періоди багатоводних та маловодних фаз. Гармоніки або циклічні складові зміни водного режиму в різних часових масштабах досліджені із застосуванням вейвлет-спектрограми — $a = 1...60$ (рис. 3, д), на якій визначені НЧ і ВЧ гармонічні (циклічні) зміни стоку Дніпра різної локалізації часового масштабу a . На рис. 3, д добре візуалізуються 6 низькочастотних гармонік формування водного режиму, які визначені на спектрограмі переходами затемнення через нульові значення: I) 1818–1840 рр. ($Q = 1733,9 \text{ м}^3/\text{с}$); II) 1841–1890 рр. ($Q = 1687,8 \text{ м}^3/\text{с}$); III) 1891–1935 рр. ($Q = 1707,1 \text{ м}^3/\text{с}$); IV) 1936–1959 рр. ($Q = 1540,6 \text{ м}^3/\text{с}$); V) 1960–1982 рр. ($Q = 1554,2 \text{ м}^3/\text{с}$); VI) 1983–2008 рр. ($Q = 1275,0 \text{ м}^3/\text{с}$). Отримані результати вейвлет-аналізу дають можливість більш точно встановити три основні періоди зміни водного режиму р. Дніпро, який з 1818 р. до 1935 р. (I період) мав природні умови і включав одну маловодну та дві багатоводні фази зміни стоку. Трансформація та становлення

нового водного режиму Дніпра почали відбуватися після створення першої греблі каскаду в 1932 р. (Дніпрогесу) та деякого часу її функціонування — цей період спектрограмою визначений з 1936 р. до 1982 р. (II період). З 1983 р. відбулася стабілізація нових умов стоку, який можемо спостерігати по теперішній час — це III період.

У період трансформації та становлення нового водного режиму річки середньобаричне значення стоку порівняно з першим періодом зменшилося на 157 (з 1704,2 до 1547,2 $\text{м}^3/\text{с}$). Таке різке зниження водності спричинено витратами великих обсягів води на заповнення головних водосховищ каскаду і посиленням водоспоживання. Середньорічне значення стоку в III періоді, порівняно з першим, зменшилося в 1,3 раза (до 1274,7 $\text{м}^3/\text{с}$). Максимальні значення середньомісячного стоку за I період досягали 13 700 $\text{м}^3/\text{с}$ (1931р.), за II — 7090 (1970 р.), за III — 4097 $\text{м}^3/\text{с}$ (1994 р.) [27]. Якщо в літньо-осінній період у багаторічному розподілі стоку відбулися незначні зміни, то значення максимального стоку в період весняної повені за II та III періоди зменшилися порівняно з першим в 1,9 та 2,6 раза відповідно (рис. 4).



Функції розподілу стоку:

$$\text{I період: } f(Q) = 4436 \exp\left[-\left(\frac{t-4,706}{1,21}\right)^2\right] + 916,1 \exp\left[-\left(\frac{t-5,762}{17,03}\right)^2\right]; \quad r^2 = 0,997$$

$$\text{II період: } f(Q) = 1656 \exp\left[-\left(\frac{t-4,631}{1,168}\right)^2\right] + 9,689 \cdot 10^{17} \exp\left[-\left(\frac{t+1435}{245,6}\right)^2\right]; \quad r^2 = 0,904;$$

$$\text{III період: } f(Q) = 615,6 \exp\left[-\left(\frac{t-4,991}{0,918}\right)^2\right] + 1643 \exp\left[-\left(\frac{t-3,068}{4,617}\right)^2\right] + 1561 \exp\left[-\left(\frac{t-12,18}{2,965}\right)^2\right]; \quad r^2 = 0,994.$$

Рис. 4. Внутрішньорічний розподіл стоку Нижнього Дніпра в різні періоди його формування

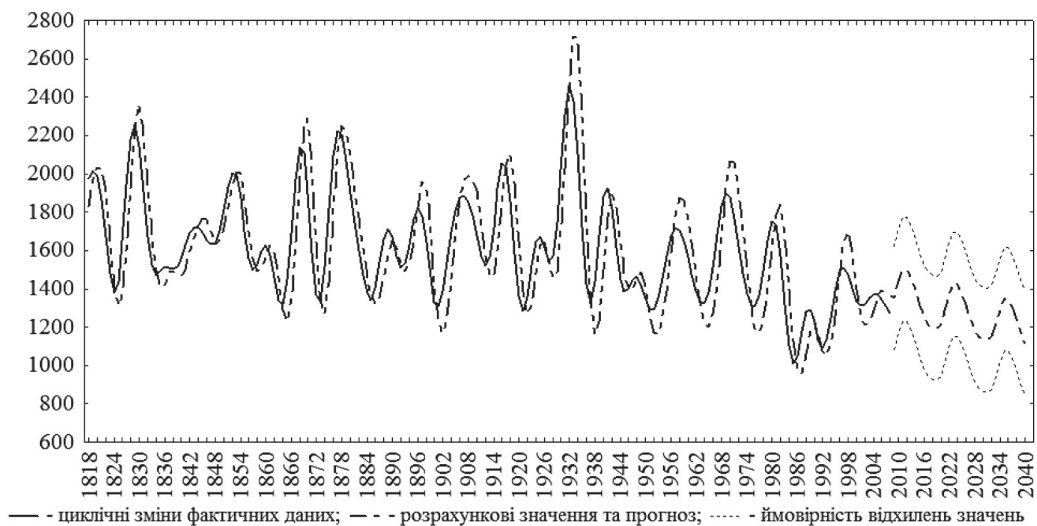


Рис. 5. Циклічні складові (QC, м³/с) та прогноз ймовірності змін динаміки стоку р. Дніпро до 2040 р.

Зниження стоку у весняно-літній період супроводжується збільшенням зимового стоку в 1,7 рази. У періоди, коли можна було б очікувати деякого підвищення водності річки, його не відбувалося через збільшення безповоротного її водоспоживання.

Будівництво і функціонування каскаду Дніпровських водосховищ докорінно змінило водний режим річки, незначна тенденція зниження стоку Дніпра зберігається й зараз. Середньорічне зменшення стоку на теперішній час склало 429,5 м³/с. Максимальне значення стоку за цей період не перевищувало 1780 м³/с. Внутрішньорічний розподіл стоку характеризується слабкою весняною повінню (в середньому 1680 м³/с) і літньо-осінньою меженню (в середньому 1090 м³/с). Середнє значення стоку за весняний період порівняно з періодом до зарегулювання Дніпра зменшилося в 1,93 рази.

В результаті часового моделювання динаміки стоку р. Дніпро (рис. 5) створено прогнозу модель:

$$\hat{Y}_{t+n} = \left(\left(\frac{0,8Y_t}{S_{t-12}} + 0,2(L_{t-1} + T_{t-1}) \right) + n(0,2(L_t - L_{t-1}) + 0,8T_{t-1}) \right) \times \left(0,9 \frac{Y_t}{L_t} + 0,1S_{t-12} \right)_{t-12+n},$$

де L_t — вплив вхідних даних передісторії часового формування стоку на прогнозний період $t+n$; T_t — відгук трендової складової; S_t — відгук сезонної складової на прогнозний період $t+n$; $n=32$ роки.

ВИСНОВКИ

При збереженні тенденції формування водного режиму р. Дніпро, з ймовірністю на 90% буде відбуватиметься незначне, але стабільне тренд-циклічне зменшення середньорічного стоку на 1,6 м³/с за рік і може становити до 2040 р. 1120±270 м³/с. Результати детального ретроспективного аналізу за 190 років і прогнозування ймовірності змін стоку р. Дніпро, підтверджують попередні висновки багатьох вчених про значну трансформацію екосистеми транскордонної річки та представляють нові знання, щодо основних етапів формування водного режиму та ймовірності подальшого зарегулювання стоку Дніпра при збереженні сучасних умов негативного впливу господарської діяльності на території транскордонного басейну.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Прытков М.Я. Районирование бассейна Ладожского озера по условиям формирования годового стока рек / М.Я. Прытков., О.М. Виноградова // География и природные ресурсы: Науч. журн. — 2007. — №1. — С. 76–83.
2. Картвелишвили Н.А. Стохастическая гидрология / Н.А. Картвелишвили — Л.: Гидрометеиздат, 1981. — 168 с.
3. Раткович Д.Я. Стохастические модели колебаний составляющих водного баланса речного бассейна / Д.Я. Раткович, М.В. Болгов — М., 1997 — 262 с.
4. Jayawardena A.W. Neighbourhood selection for local modelling and prediction of hydrological time series / A.W. Jayawardena, W.K. Li, P. Xu // Journal of Hydrology. — 2002. — Vol. 258 (1–4). — P. 40–57.

5. *Sivakumar B.* Chaos theory in geophysics: past, present and future / B. Sivakumar // *Chaos, Solitons and Fractals*. — 2004. — Vol. 19. — P. 441–462.
6. *Regonda S.K.* Temporal scaling in river flow: can it be chaotic? / S.K. Regonda, B. Sivakumar, A. Jain // *Hydrological Sciences*. — 2004. — Vol. 24. — P. 373–385.
7. *Коваленко В.В.* Фрактальная диагностика речного стока для устойчивого описания многолетних колебаний гидрологических характеристик / В.В. Коваленко, Е.В. Гайдукова, А.Б.Г. Куасси // *Метеорология и гидрология*. — 2008. — № 4. — С. 73–80.
8. *Lisetskii F.N.* Comparative assessment of methods for forecasting river runoff with different conditions of organization / F.N. Lisetskii, V.I. Pichura, Y.V. Pavlyuk, O.A. Marinina // *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. — 2015. — Vol. 6. — № 4. — P. 56–60.
9. *Кузьменко Я.В.* Оценка и прогнозирование стока малых рек в условиях антропогенных воздействий и изменений климата / Я.В. Кузьменко, Ф.Н. Лисецкий, В.И. Пичура // *Современные проблемы науки и образования*. — 2012. — № 6 — С. 1–9.
10. *Шапарь А.Г.* Особенности влияния техноэко-системы бассейна р. Днепр на шельф Черного моря / А.Г. Шапарь, О.А. Скрипник, Н.А. Емец. Интернет-публикация: https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKewjO6ejCltHUAhWCtRoKHVmA1MQFggjMAA&url=http%3A%2F%2Ffirbis-nbu.gov.ua%2Fcgi-bin%2Ffirbis_nbu-v%2Fcgiiirbis_64.exe%3FC21COM%3D2%26I21D-BN%3DUJRN%26P21DBN%3DUJRN%26IMAGE_FILE_DOWNLOAD%3D1%26Image_file_name%3DDPDF%2Febpsz_2013_27_41.pdf&usg=AFQjCNF6nFywCvXNCbLxdUuuh3fUY2QM7.
11. *Осадчий В.І.* Гідрохімічний довідник. Поверхневі води України. Гідрохімічні розрахунки. Методи аналізу / В.І. Осадчий, Б.Й. Набиванець, Н.М. Осадча, Ю.Б. Набиванець. — К.: Ніка-Центр, 2008. — 656 с.
12. *Вишневський В.І.* Водогосподарський комплекс у басейні Дніпра / В.І. Вишневський, В.А. Сташук, А.М. Сакевич. — К.: Інтерпрес ЛТД, 2011. — 188 с.
13. *Хільчевський В.К.* Гідролого-гідрохімічна характеристика мінімального стоку річок басейну Дніпра / В.К. Хільчевський, І.М. Ромась. — К.: Ніка-Центр, 2007. — 184 с.
14. *Гребінь В.В.* Географо-гідрологічний аналіз як метод досліджень сучасних змін водного режиму річок / В.В. Гребінь // *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. — 2006. — Т. 9. — С. 17–30.
15. *Юшкина О.А.* Анализ и прогноз временной изменчивости речного стока методами нелинейной динамики: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — Иркутск, 2009. — 20 с.
16. *Андрианова О.Р.* О некоторых особенностях климатической изменчивости расходов рек Дуная, Днестра и уровня моря в Одессе в XX столетии / О.Р. Андрианова, Р.Р. Белевич, М.И. Скипа. Режим доступа: <http://www.ecologylife.ru>.
17. *Лисецкий Ф.Н.* Периодичность климатических, гидрологических процессов и озерного осадконакопления на юге Восточно-Европейской равнины / Ф.Н. Лисецкий, В.Ф. Столба, В.И. Пичура // *Обществ.-науч. журн. «Проблемы региональной экологии»*. — 2013. — № 4. — С. 19–25.
18. *Швец Г.И.* Многовековая изменчивость стока Днестра / Г.И. Швец — М.: Гидрометеиздат, 1979. — 84 с.
19. *Коржов Е.И.* Некоторые экологически значимые аспекты водного режима Нижнего Днестра / Е.И. Коржов // *Наук. читання, присвячені Дню науки: Зб. наук. пр.* — Херсон: ПП Вишемирський В.С. — 2010. — Вип. 3. — С. 4–9.
20. *Mayer Y.* Wavelets, generalized white noise and fractional: the synthesis of fractional Brownian motion / Y. Mayer // *The Journal of Fourier Analysis and Applications*. — 1995. — № 5 (5). — P. 465–494.
21. *Яковлев А.Н.* Введение в вейвлет-преобразование / А.Н. Яковлев. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. — 104 с.
22. *Андерсон Т.* Статистический анализ временных рядов / Т. Андерсон — М.: Наука, 1976. — 343 с.
23. *Клеопатров Д.И.* Прогнозирование экономических показателей с помощью метода простого экспоненциального сглаживания. Статистический анализ экономических временных рядов и прогнозирование / Д.И. Клеопатров, А.А. Френкель. — М.: Наука, 1973. — 298 с.
24. *Brown R.G.* Economic Order Quantities for Materials Subject to Engineering Changes / R.G. Brown // *Production and Inventory Management*. — 1971. — Vol. 12. — No. 2. — P. 89–91.
25. *Жукинський В.Н.* Дніпровсько-Бугська естуарна система / В.Н. Жукинський, Л.А. Журавлева, А.И. Иванов. — К.: Наук. думка, 1989. — 374 с.
26. *Pichura V.I.* Forecasting of Hydrochemical Regime of the Lower Dnieper Section using Neurotechnologies / V.I. Pichura, Yu.V. Pilipenko, F.N. Lisetskiy, O.E. Dovbysh // *Hydrobiological Journal*. — 2015. — Vol. 51. — No 3. — P. 100–110.
27. *Костяницін М.Н.* Гідрологія устьєвої області Дніпра і Южного Буга. / М.Н. Костяницін. — М.: Гидрометеиздат, 1964. — 336 с.