

## ПРИРОДНИЧО-ГЕОГРАФІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

УДК 556.047+556.06 (477)

DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2021.04.018>

**О. І. Лук'янець, О. Г. Ободовський, В. В. Гребінь, С. О. Москаленко,  
О. О. Почаєвець, В. О. Корнієнко**

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ

### ПРОГНОЗНІ ОЦІНКИ ВОДНОГО СТОКУ РІЧОК УКРАЇНИ НА ОСНОВІ СТОХАСТИЧНИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ЙОГО БАГАТОРІЧНИХ КОЛИВАНЬ

Мета дослідження – надати прогностичні оцінки середнього річного стоку води річок України до середини поточного сторіччя на основі виявлених за історичними (спостереженими) даними закономірностей його природної мінливості. Для забезпечення довгострокових прогнозів було використано стохастичні методи дослідження, за якими виділено в межах України території із синхронними коливаннями стоку води. Перша група поєднує басейни річок Вісли, Дністра, суббасейнів Тиси, Пруту та Сірета (басейн Дунаю), суббасейнів Прип'яті (басейн Дніпра), друга – басейни річок Південного Бугу, Дону, суббасейнів Десни, Середнього та Нижнього Подніпров'я (басейн Дніпра) та басейну річок Приазов'я. Відповідно до виявлених стохастичних закономірностей надано прогностичні оцінки водного стоку річок України: для першої групи річкових басейнів – у 2021–2023 рр. триватиме маловодна фаза, слідом за нею настане багатоводна фаза, що триватиме 2038–2040 рр., а потім зміниться черговою маловодною у 2049–2051 рр.; для другої групи у 2020–2022 рр. спостерігатиметься багатоводна фаза, яка в 2034–2036 рр. буде змінена маловодною до 2045–2047 рр. Багатоводні фази за водністю перевищують маловодні в середньому в 1,3–1,5 рази.

**Ключові слова:** річки України; природні коливання стоку; довгострокові тенденції змін водності; цикли водності; стохастичні закономірності; довгострокове прогнозування стоку води.

**O. I. Lukianets, O. G. Obodovskyj, V. V. Grebin, S. O. Moskalenko, O. O. Pochaievets,  
V. O. Korniienko**

Taras Shevchenko National University of Kyiv

### FORECAST ESTIMATES OF WATER RUNOFF OF RIVERS OF UKRAINE ON THE BASIS OF STOCHASTIC PATTERNS OF ITS LONG-TERM FLUCTUATIONS

The purpose of the study is to provide predictive estimates of the average annual water flow of Ukrainian rivers by the middle of this century. Such a forecast was developed on the basis of stochastic regularities in its natural long-term variability revealed from historical (observable) data. At the same time, the identification of the cyclic component and the formalization of long-term runoff fluctuations in the form of cyclic ones with the release of high-water and low-water phases of water content were carried out. To provide long-term forecasts, stochastic research methods were used: graphical analysis of difference integral curves, autocorrelation analysis, criteria for the series and the longest series length, etc. According to the results of the study, territories with synchronous fluctuations in water flow were identified within Ukraine. The first group unites the basins of the Vistula, Dniester, Tisza, Prut and Siret, Pripjat rivers, the second group - the basins of the Southern Bug, Don, Desna, Middle and Lower Dnieper rivers and the Azov river basin. Formalization of fluctuations in the average annual runoff according to observation data showed that the rivers of the first group have longer periods of water availability cycles – within  $29 \pm 2$  years than in the second group, where the cycles have a shorter duration –  $23 \pm 2$  years. As for the phases of water content, the low-water phase for the first group is  $10 \pm 2$  years, and for the second group –  $8 \pm 2$  years. Accordingly, the high-water phases in the territory of the river basins of the first group last  $17 \pm 2$  years, and within the river basins of the second group –  $13 \pm 2$  years. In accordance with the identified stochastic regularities, predictive estimates of the water flow of the rivers of Ukraine are provided. For the first group of river basins, the low-water phase will last until 2021–2023, followed by a high-water phase until 2038–2040 and then again low-water until 2049–2051. For the second group, a high-water phase will begin

in 2020–2022, and in 2034–2036 it will be replaced with a low-water phase until 2045–2047. Basically, high-water phases in terms of water content are higher than low-water ones by an average of 1.3–1.5 times.

**Keywords:** rivers of Ukraine; natural fluctuations of runoff; long-term trends; water cycles, stochastic patterns; long-term water runoff forecasting.

### Актуальність теми дослідження

Виявлення тенденцій і змін в часових рядах водного стоку річок з оцінкою його довгострокової мінливості та прогнозування водних ресурсів є найважливішим і водночас найскладнішим питаннями в гідрології. Такі наукові пошуки базуються на детальному аналізі минулого з подальшою інтерпретацією майбутнього. Актуальність теми представленого дослідження полягає в тому, що знання закономірностей в коливаннях річкового стоку води, тривалості і характеру чергування циклів та їх складових – маловодних і багатоводних фаз водності, і, тим більше, їх передбачення, істотно допомагає при плануванні та раціональному використанні водних ресурсів, оцінюванні гідроенергетичного потенціалу річок, підвищенні ефективності експлуатації меліоративних систем, гідроенергетичних та інших водогосподарських споруд.

### Стан вивчення питання, основні праці

Протягом 1990-х – на початку 2000-х років відбувся помітний прогрес у дослідженнях тривалих гідрологічних часових рядів, який став можливим не лише тому, що накопичилися дані спостережень, а й завдяки розробленню стохастичних методів (моделей) для опису структури часових послідовностей. Необхідно відзначити такі роботи: Ван Гелдер у співавт. [1], П. Броквелл і Р. Девіс [2], М. Лоре у співавт. [3], А. Рао та Л. Хамед [4] та ін. Було виявлено різні періодичності сухих і вологих періодів в опадах і температурі повітря та тривалості циклів водності у часових рядах річкового стоку, зокрема йдеться про роботи: Р.Бразділ і Т. Там [5], А. Валанус і Р. Сожа [6], М. Сусідко [7-8], П. Пекарова та П. Мікланек [9–10], А. Рао та Л. Хамед [11], О. Лук'янець та Т. Камінська [12–13], О. Ободовський у співавт. [14] та ін. Протягом останніх років дослідження з цієї проблематики активно здійснювались у науково-дослідному секторі гідроекології і гідрохімії географічного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка в межах таких науково-дослідних робіт: «Гідроекологічна оцінка і прогноз енергетичного потенціалу річок Українських Карпат» (№ державної реєстрації

0114U003482), «Гідроекологічна оцінка енергетичного потенціалу річок басейну Дніпра (в межах України) в умовах змін клімату» (№ державної реєстрації 0116U004827); «Гідроекологічна оцінка енергетичного потенціалу річок України в умовах кліматичних змін» (№ державної реєстрації 01118U001098).

Мета дослідження – за результатами детального аналізу природної мінливості та довгострокових тенденцій у минулих щорічних часових рядах стоку води річок України ідентифікувати циклічну складову та виконати прогноз водного стоку на основі виявлених стохастичних закономірностей його багаторічних коливань на наступні 30 років.

### Методи дослідження

Для виявлення стохастичних закономірностей у багаторічних коливаннях річкового стоку води стокову характеристику  $Q$  розглядають як випадковий процес  $Q(t)$  з дискретним часом  $t \in T$ . Значення  $t=1, 2, \dots, N$  відносять до наявного ряду за  $N$  років спостережень; значення  $t=N+1, N+2, \dots$  відносять до наступних періодів часу, а значення  $t=0, -1, -2, \dots$  – до попередніх. Для опису процесу  $Q(t)$  досліднику необхідно оволодіти набором функцій, найважливішими з яких є функції математичного сподівання, дисперсії або середнього квадратичного відхилення, розподілу ймовірностей, автокореляційна функція тощо [2, 3, 15, 16].

Прогнозні оцінки стоку води річок на основі стохастичних часових закономірностей його мінливості полягають у виявленні за історичними даними циклічності багаторічних коливань такого стоку. Під циклічними коливаннями (циклічністю) розуміють мінливість величин часових рядів, яка має різну ступінь регулярності за умови існування математичних сподівань параметрів цих коливань [8, 12, 15]. Циклічність може бути обумовлена кореляцією між значеннями за різні, насамперед найближчі, роки. Наявність внутрішньорядної кореляції проявляється у вигляді тенденцій до групування років з підвищеними і пониженими значеннями у формі циклів багаторічних коливань водності. При цьому математичне сподівання випадкового процесу спадає

або зростає не монотонно, а хвилеподібно. Хвилеподібні коливання, що повторюються через деякий проміжок часу, відповідають періодичному випадковому процесу  $Q(t)$ . При постійній зміні тривалості таких хвиль виникає циклічність багаторічних коливань гідрологічної характеристики  $Q$ .

Для надійного опису багаторічних коливань стоку певної території необхідний аналіз просторової специфіки водного режиму річок. Насамперед це встановлення його синхронності або асинхронності. Збіг коливань стоку річок за окремі роки (хронологічний збіг) визначає їхню синхронність [17]. Для цього проводять згладжування (форма статистичної фільтрації) вихідного ряду, в результаті створюють часовий ряд, в якому спектральні компоненти з високою частотою вихідної послідовності (або амплітуди хвиль) зменшуються. Також визначають кореляційну матрицю між часовими послідовностями стоку води річок сусідніх басейнів.

Для формалізації багаторічних коливань річного водного стоку у вигляді циклічних з угрупованнями багатководних та маловодних фаз та оцінювання їх кількісних показників (тривалості, інтенсивності) доцільно застосовувати: графічний аналіз різницевої інтегральних кривих, за яким можна виділити періоди підвищеного та пониженого стоку води річок, їх чергування, але без

прив'язки до певних календарних років; автокореляційний аналіз, що ґрунтується на прийнятті гіпотези про стаціонарність процесів, що їх зумовлюють; критерії серій та найбільшої довжини серій для перевірки статистичної достовірності існування фаз підвищеної та пониженої водності. Алгоритм розрахунку багаторічних коливань стоку наведений в роботах [12–14, 18].

### Виклад основного матеріалу з обґрунтуванням отриманих наукових результатів

Досвід попередніх досліджень засвідчує, що найбільшого успіху у вивченні часових коливань стоку можна досягти, якщо розглядати тривалі часові ряди гідрологічних характеристик великого масштабу, тобто стік води великих басейнів, на котрі не здійснюють помітного впливу випадкові фактори і місцеві умови [12, 15, 18, 19]. Річковий стік в замикальному створі є інтегральною характеристикою зволоження басейну, яка згладжує випадковості у режимі опадів на невеликих площах. Для виявлення тенденцій і змін у часових рядах гідрологічних змінних, встановлення стохастичних закономірностей у багаторічних коливаннях середнього річного стоку річок України спершу досліджували стокові показники на річках, що мають найтриваліші ряди спостережень (таблиця 1)

Для виявлення просторових особливостей у

Таблиця 1

#### Перелік річок України, які мають найтриваліші ряди спостережень за стоком води

Річка - гідрологічний пост	Площа басейну, км <sup>2</sup>	Період спостережень (кількість років)
р. Тиса - смт Вилोक*	9140	1883-2015 (133)
р. Дністер - м. Заліщики	72100	1882-2015 (132)
р. Прут - м. Чернівці	27540	1895-2015 (121)
р. Прип'ять - м. Мозир (Білорусь)	101000	1882-2015 (132)
р. Південний Буг - м. Олександрівка**	46200	1914-2015 (102)
р. Десна - м. Чернігів	81400	1895-2015 (121)
р. Сула - м. Лубни	14200	1936-2015 (80)
р. Псел - с. Запсілля	21800	1927-2015 (89)
р. Сіверський Донець – м. Зміїв	16600	1923-2015 (93)
р. Сіверський Донець - м. Лисичанськ**	52400	1892-2015 (124)
р. Кальміус – смт Сартана**	3700	1928-2015 (88)
р. Салгир – с. Листяне (с. Дворіччя)	3540	1952-2012 (61)

Примітки:

\* відновлення середнього річного стоку води за 1883-1934 рр. за даними спостережень поста Вашарошнамень (Угорщина, F=29057 км<sup>2</sup>);

\*\* є деякі пропуски в даних спостережень

розподілу стоку води річок використано гідрографічне районування України (райони річкових басейнів та суббасейнів) [20], а для обґрунтування отриманих наукових результатів залучено дані спостережень за стоком з понад 290 гідрологічних постів, що належать до мережі Гідрометеорологічної служби ДСНС України, з них 83% мають періоди спостережень  $\geq 50$  років, а лише 17%  $-\leq 50$  років [21]. Перевірка на однорідність рядів спостережень за середньорічним стоком води на річках України за критеріями Фішера, Стюдента та Вількоксона при 5 % рівні значимості, як вже зазначалося [21, 22], показала доволі високий відсоток їх однорідності – за різними критеріями на 78–89% постів. Це свідчить про відсутність спрямованих змін річного стоку води річок на більшій частині території країни [22].

Для виявлення просторової синхронності коливань водності річок в межах України побудовано хронологічні послідовності середньорічних витрат води та їх згладжування і розраховано кореляційну матрицю (таблиця 2) середньорічного стоку води річок, що мають в замикальних створах найдовші ряди гідрометричних спостережень.

Помітною є часова мінливість стокових рядів та певна її синхронність. Аналіз просторової кореляційної матриці часових послідовностей середньорічного стоку води річок в межах України (табл. 2) та коефіцієнтів парної кореляції  $r_{Q(t)}$  з його стандартною похибкою  $\pm\sigma_r$ , як показників подібності внутрішньої структури досліджуваних рядів, показав, що спостережені закономірності коливань середнього річного стоку води не

Таблиця 2

**Просторова кореляційна матриця часових послідовностей середньорічного стоку води річок в межах України (коефіцієнти парної кореляції  $r_{Q(t)}$  з стандартною похибкою  $\pm\sigma_r$ )**

Річкові басейни	р. Тиса (Вилок)	р. Дністер (Заліщики)	р. Прут (Чернівці)	р. Прип'ять (Мозир)	р. Південний Буг (Олександрівка)	р. Десна (Чернігів)	р. Сула (Лубни)	р. Псел (Запсілля)	р. Сіверський Донець (Лисичанськ)	р. Кальміус (Саргана)	р. Салгир (Листяне (Дворіччя))
р. Тиса (Вилок)	<b>1</b>										
р. Дністер (Заліщики)	<b>0,70±</b> 0,04	<b>1</b>									
р. Прут (Чернівці)	<b>0,57±</b> 0,06	<b>0,71±</b> 0,05	<b>1</b>								
р. Прип'ять (Мозир)	0,43± 0,05	<b>0,55±</b> 0,06	0,33± 0,09	<b>1</b>							
р. Південний Буг (Олександрівка)	0,39± 0,07	<b>0,50±</b> 0,08	0,42± 0,07	0,44± 0,08	<b>1</b>						
р. Десна (Чернігів)	0,24± 0,08	0,18± 0,11	0,07± 0,06	0,47± 0,07	0,39± 0,11	<b>1</b>					
р. Сула (Лубни)	0,31± 0,12	0,27± 0,12	0,31± 0,11	0,30± 0,09	<b>0,65±</b> 0,08	<b>0,78±</b> 0,05	<b>1</b>				
р. Псел (Запсілля)	0,41± 0,10	0,35± 0,14	0,32± 0,15	0,38± 0,10	<b>0,68±</b> 0,08	<b>0,73±</b> 0,06	<b>0,88±</b> 0,04	<b>1</b>			
р. Сіверський Донець (Лисичанськ)	0,31± 0,12	0,25± 0,11	0,23± 0,13	0,12± 0,09	<b>0,55±</b> 0,07	0,43± 0,08	<b>0,51±</b> 0,06	<b>0,67±</b> 0,05	<b>1</b>		
р. Кальміус (Саргана)	0,27± 0,1	0,23± 0,08	0,28± 0,09	0,09± 0,05	0,49± 0,06	0,29± 0,09	0,47± 0,08	<b>0,58±</b> 0,06	<b>0,68±</b> 0,04	<b>1</b>	
р. Салгир (Листяне (Дворіччя))	0,06± 0,05	0,27± 0,09	0,03± 0,02	0,18± 0,09	0,05± 0,03	0,17± 0,10	-0,05± 0,05	0,05± 0,04	0,003± 0,04	0,35± 0,08	<b>1</b>

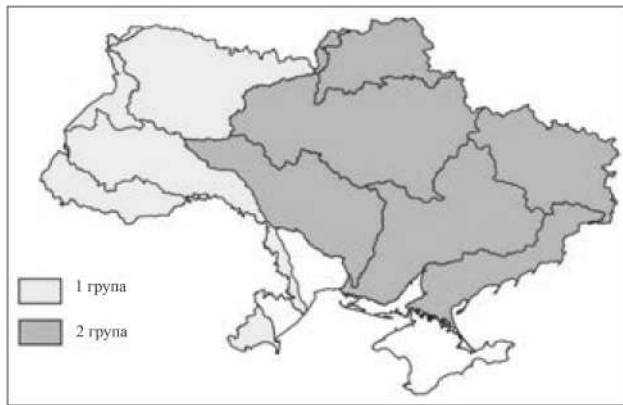


Рис. 1. Групи річкових басейнів та суббасейнів за синхронністю коливань середнього річного стоку води

є загальними для всіх річок [23].

Статистично значимі коефіцієнти кореляції середнього річного стоку помітні для двох груп річкових басейнів (рис. 1): перша група – річкові басейни Вісли, Дністра, суббасейнів Тиси, Пруту і Сірету (басейн Дунаю), суббасейну Прип'яті (басейн Дніпра); друга група – річкові басейни Південного Бугу, Дону, суббасейнів Десни, Середнього та Нижнього Дніпра (басейн Дніпра) та басейну річок Приазов'я [23]. Варто відмітити, що за внутрішньою структурою середнього річного стоку суббасейн Прип'яті (басейн Дніпра) та річковий басейн Південного Бугу є умовно перехідними між виділеними групами. Басейн річок Криму розглядається окремо – середньорічний стік води не корелюється ні з одним басейном, навіть з прилеглими до нього (таблиця 2).

Підтвердженням вищезазначеного є узагальнені різниці інтегральні криві для річкових басейнів гідрографічного районування України за період 1882–2015 рр. (рис. 2). Для їх побудови використано різниці інтегральні криві часових послідовностей середніх річних витрат води річок, що протікають усередині досліджених річкових басейнів та суббасейнів. Їх аналіз для виділених груп річкових басейнів та суббасейнів показав, що в їх структурі є періодичності, які представляють послідовні зміни маловодних та багатоводних фаз водності. Так, середній річний стік води річок басейну Вісли, суббасейнів Тиси, Пруту і Сірету, басейну Дністра та суббасейну Прип'яті має триваліші цикли водності в межах 28–34 років у порівнянні з річками басейну Південного Бугу, суббасейнів Десни, Середнього та Нижнього Дніпра, басейну Дону та басейну річок Приазов'я, в яких виокремлюються періодичнос-

ті меншої тривалості – 18–24 роки. Як видно з рис. 2, на деяких проміжках часу цикли для зазначених територій мають асинхронні коливання, на деяких часових відрізках вони синхронізуються. На річках Криму коливання водності мають відмінні риси утворення циклічної складової. Також слід відзначити, що в межах циклів помітними є гармоніки, тривалість яких коротка за часом (декілька років). Вони утворюють внутрішні сплески в основному циклі.

Для формалізації багаторічних коливань середнього річного водного стоку досліджуваної території у вигляді циклічних коливань з виділенням багатоводних та маловодних фаз та оцінювання їх кількісних показників – тривалості, інтенсивності – було застосовано автокореляційний аналіз (рис. 3). Для судження про статистичну значущість визначених ординат автокореляційних функцій встановлено довірчі межі при 5% рівні значимості, які теж відображені на рис. 3 у вигляді пунктирної лінії.

Аналізуючи корелограми для кожного досліджуваного річкового басейну, можна відзначити певні особливості в їхній структурі. У створах гідрологічних постів річок простежується закономірний хід функцій, котрий в залежності від величини зсуву  $\tau_m$  набуває додатних або від'ємних значень. У рамках прийнятої часової області реалізації (30 років) автокореляційні функції досягають додатних максимумів у певних точках і в деяких випадках вони перевищують довірчі межі. Саме вони визначають тривалість переважаючого циклу водності з ймовірністю 95%.

Для першої групи річкових басейнів (басейни Вісли, Дністра, суббасейнів Тиси, Пруту і Сірету, суббасейну Прип'яті) чітко простежується 29-річний цикл. Для другої групи річкових басейнів (річкові басейни Південного Бугу, Дону, суббасейнів Десни, Середнього та Нижнього Дніпра та басейну річок Приазов'я) має вагу 21–25-річний цикл (рис. 3).

З метою з'ясування наявності відмінностей у часовій тривалості циклів виділених груп річкових басейнів і суббасейнів та для обґрунтованих висновків щодо структури коливань середнього річного стоку води річок України також були побудовані автокореляційні функції для р. Дунай – м. Рені ( $F=811000$  км<sup>2</sup>, період спостережень 1861–2015 рр., їх тривалість 155 років) та Дніпро – Лоцманська Кам'янка ( $F=459000$  км<sup>2</sup>, 1818–1962 рр. (був закритий 1962 р. у зв'язку з

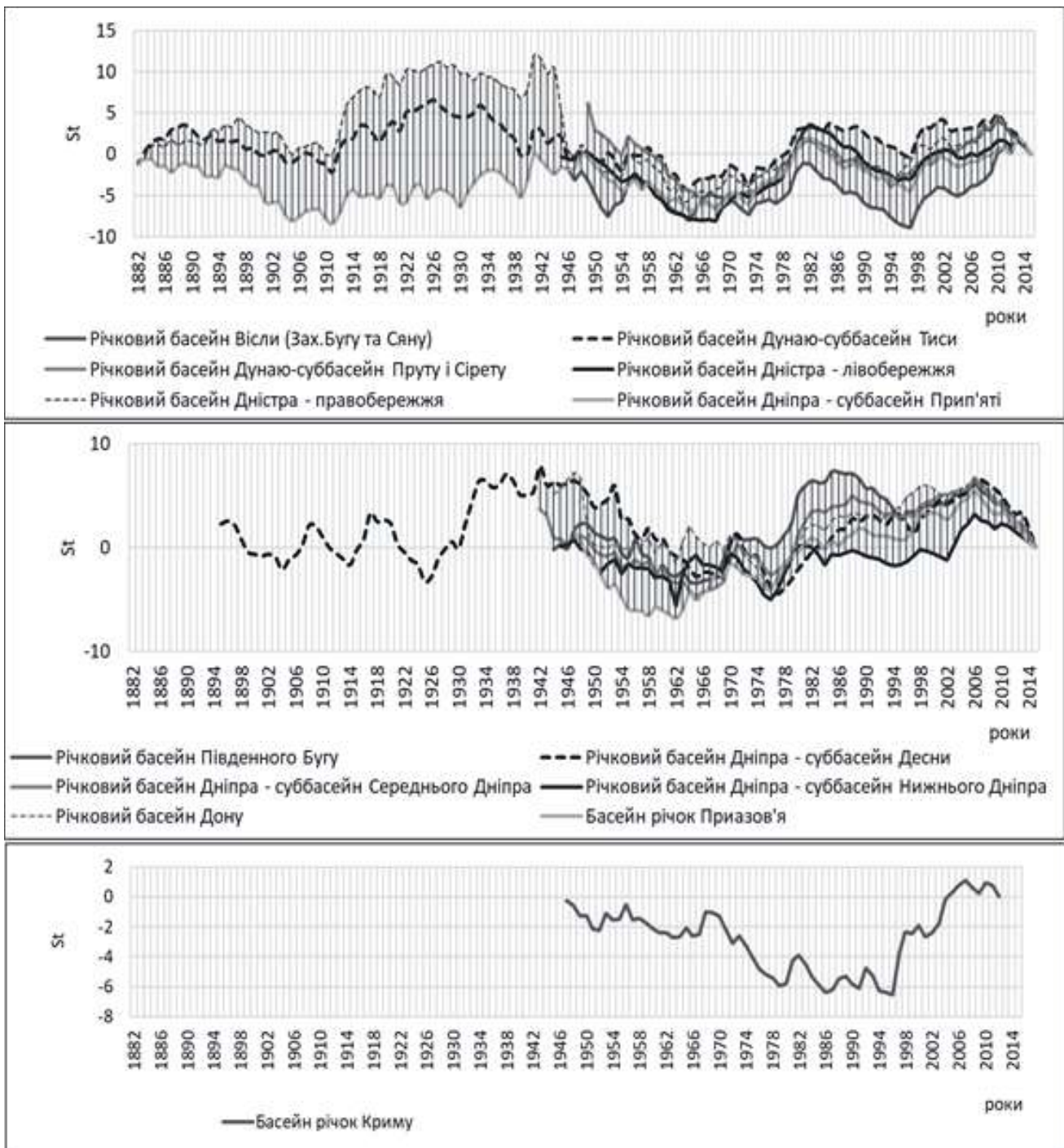


Рис. 2. Узагальнені різницеві інтегральні криві середнього річного стоку води в межах річкових басейнів та суббасейнів гідрографічного районування України за період 1882–2015 рр.

побудовою водосховищ на Дніпрі), їх тривалість 145 років (рис. 4). Аналіз корелограм середньорічних витрат води р. Дунай – м. Рені та Дніпро – Лоцманська Кам'янка підтверджує зазначені

висновки.

Значущість відповідних виділених періодів та перевірку статистичної достовірності існування фаз підвищеного та пониженого стоку води у

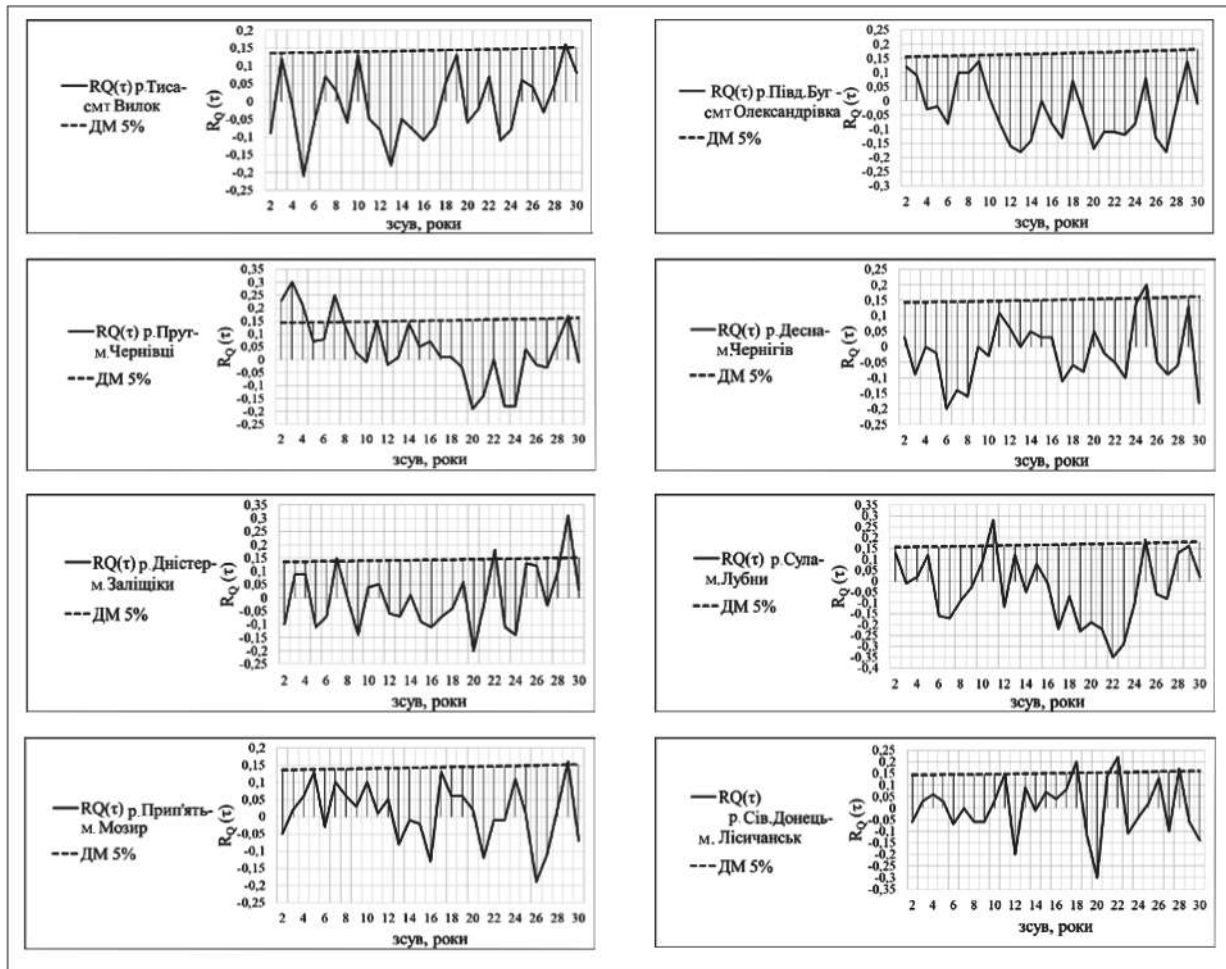


Рис. 3. Корелограми часових послідовностей середньорічних витрат води річок України

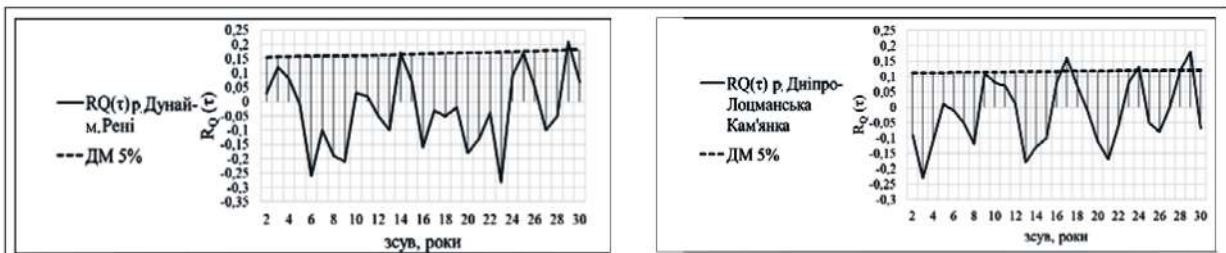


Рис. 4. Корелограми часових послідовностей середньорічних витрат води річок Дунай біля м. Рені та Дніпро біля р-ну Лоцманська Кам'янка

циклах водності, і відповідно, порушення умови стаціонарності здійснено за допомогою критерію серій [13–14, 15, 18]. При рівні значущості  $\alpha=1\%$  для всіх розрахованих статистик критерію серій виконується умова: статистика, визначена за фактичними даними, менше аналітичного значення при  $\alpha=1\%$ , що означає, що вони потрапляють в довірчі межі. Тож гіпотеза про ймовірнісну структуру гідрологічних рядів підтверджується – існують

статистично достовірні тенденції до утворення серій підвищених і понижених значень.

Для визначення тривалості підвищених або понижених угруповань років (серій) використано статистику критерію найбільшої довжини серій  $K_\alpha$  [13–14, 15, 18]. Розрахунки показали, що найбільшу довжину мають серії, що складаються з елементів пониженого стоку відносно вибіркового середнього річних витрат води з відповідного

річкового водозбору. За порівнянням емпіричних статистик за спостереженими вибірками з їх аналітичними значеннями при рівні значимості  $\alpha=5\%$  виконується умова  $K_{емп} < K_{\alpha}$ , а це означає, що гіпотеза не спростовується та існують тенденції до угруповань у послідовностях водного стоку, і такі тенденції являються статистично достовірними. Доведено, що для 1 групи річкових басейнів угруповання маловодних років можуть скласти  $10\pm 2$  років, а для 2 групи –  $8\pm 2$  роки.

Для прогнозних оцінок коливань водного стоку річок України було виділено фази водності в стокових рядах в межах двох груп районів річкових басейнів та суббасейнів згідно схеми гідрографічного районування території України. При цьому враховано основну повторюваність циклу, визначену тривалість маловодної фази і просторову синхронність стоку води у зазначених групах басейнів. Для достовірної оцінки коливань стоку для обох груп басейнів періоди циклів та фаз приймалися однаковими в часових межах та хронології. Середній річний стік води на річкових басейнах першої групи, як вже зазначалося, мають триваліші спостережені цикли водності ( $29\pm 2$  роки) у порівнянні з другою групою, в яких

відокремлюються періодичності меншої тривалості ( $23\pm 2$  роки). Щодо фаз водності, то для першої групи сукупність маловодних років складає  $10\pm 2$  роки, а для другої групи –  $8\pm 2$  роки. Відповідно багатоводні фази в межах річкових басейнів першої групи тривають  $17\pm 2$  роки та другої групи –  $13\pm 2$  роки.

У таблиці 3 подано часові періоди багатоводних та маловодних фаз водності, виділених за середніми річними витратами води на річках для двох груп річкових басейнів та прогнозні оцінки фаз водності на період до 2050 р. (на основі виявлених стохастичних закономірностей мінливості водності).

Зазначимо, що для басейнів річок Причорномор'я та річок Криму неможливо виділити фази водності: для Причорномор'я – замало пунктів спостереження, для Криму – немає тривалих рядів спостережень за стоком води.

Використовуючи встановлені межі багатоводних та маловодних фаз для двох груп річкових басейнів та суббасейнів, для річок кожного з них було визначено середні витрати води у фази водності та отримано залежності між середнім річним стоком води за багаторічний період та се-

Таблиця 3

**Часові проміжки фаз водності за даними спостережень та їх прогнозні оцінки для груп річкових басейнів**

Фази водності	↑ - багатоводна, ↓ - маловодна	Річкові басейни та суббасейни
за період спостережень	↑	1940↔ 1955
	↓	1956↔ 1964
	↑	1965↔ 1981
	↓	1982↔ 1992
	↑	1993↔ 2010
прогнозні оцінки	↓	2011-2013↔ 2021-2023-
	↑	2022-2024↔ 2038-2040
	↓	2039-2041↔ 2049-2051
за період спостережень	↓	1948↔ 1957
	↑	1958↔ 1970
	↓	1971↔ 1977
	↑	1978↔ 1986
	↓	1987↔ 1997
прогнозні оцінки	↑	1998↔ 2007
	↓	2008-2010↔ 2018-2020-
	↑	2019-2021↔ 2034-2036
	↓	2035-2037↔ 2045-2047
не виділено - недостатньо даних спостережень		Басейн річок Причорномор'я, басейн річок Криму



Таблиця 4

## Рівняння переходу від середнього річного стоку води річок України та до стоку води в багатоводну та маловодну фази водності

Річкові басейни	Діапазони		Прогнозні рівняння переходу від середнього річного стоку ( $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ )	
	норм середніх річних витрат води $\bar{Q}$ , $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$	коефіцієнт варіації норм річного стоку води $C_V$	до стоку води ( $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ) в багатоводну фазу водності $\bar{Q}_{\text{БАГ}}$	до стоку води ( $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ) в маловодну фазу водності $\bar{Q}_{\text{МАЛ}}$
I. Річковий басейн Вісли (Західного Бугу та Сяну)	0,4-33,6	0,23-0,45	при $\bar{Q} \geq 1,5 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$	
			$\bar{Q}_{\text{БАГ}} = 1,1651 \bar{Q} - 0,2308$	$\bar{Q}_{\text{МАЛ}} = 0,7971 \bar{Q} - 0,0746$
II. Річковий басейн Дунаю				
суббасейн Тиси	0,6-204	0,21-0,40	при $\bar{Q} \geq 0,2 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$	
			$\bar{Q}_{\text{БАГ}} = 1,0735 \bar{Q} - 0,0074$	$\bar{Q}_{\text{МАЛ}} = 0,8794 \bar{Q} + 0,0111$
суббасейн Пруту і Сірету	0,35-67,2	0,26-0,43	при $\bar{Q} \geq 0,2 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$	
			$\bar{Q}_{\text{БАГ}} = 1,1089 \bar{Q} + 0,1029$	$\bar{Q}_{\text{МАЛ}} = 0,8379 \bar{Q} - 0,0984$
III. Річковий Басейн Дністра				
лівобережжя	0,2-14,3	0,22-0,59	при $\bar{Q} \geq 0,2 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$	
			$\bar{Q}_{\text{БАГ}} = 1,0545 \bar{Q} + 0,1205$	$\bar{Q}_{\text{МАЛ}} = 0,9249 \bar{Q} - 0,1737$
правобережжя	1,8-256	0,19-0,87	при $\bar{Q} \geq 1,3 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$	
			$\bar{Q}_{\text{БАГ}} = 1,1035 \bar{Q} - 0,1305$	$\bar{Q}_{\text{МАЛ}} = 0,8588 \bar{Q} + 0,1772$
IV. Річковий басейн Південного Бугу	0,26-88,4	0,26-0,65	при $\bar{Q} \geq 0,3 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$	
			$\bar{Q}_{\text{БАГ}} = 1,116 \bar{Q} - 0,0125$	$\bar{Q}_{\text{МАЛ}} = 0,8918 \bar{Q} - 0,2135$
V. Річковий басейн Дніпра				
суббасейн Прип'яті	0,6-53	0,23-0,65	при $\bar{Q} \geq 0,3 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$	
			$\bar{Q}_{\text{БАГ}} = 1,0862 \bar{Q} + 0,0698$	$\bar{Q}_{\text{МАЛ}} = 0,8717 \bar{Q} - 0,2274$
суббасейн Десни	3,8-345	0,23-0,34	при $\bar{Q} \geq 1,2 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$	
			$\bar{Q}_{\text{БАГ}} = 1,0918 \bar{Q} - 0,0952$	$\bar{Q}_{\text{МАЛ}} = 0,8895 \bar{Q} + 0,109$
суббасейн Середнього Дніпра	0,3-49,4	0,28-1,11	при $\bar{Q} \geq 0,2 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$	
			$\bar{Q}_{\text{БАГ}} = 1,098 \bar{Q} + 0,0953$	$\bar{Q}_{\text{МАЛ}} = 0,8917 \bar{Q} - 0,0981$
суббасейн Нижнього Дніпра	0,6-15,6	0,42-0,8	при $\bar{Q} \geq 0,7 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$	
			$\bar{Q}_{\text{БАГ}} = 1,2193 \bar{Q} - 0,1269$	$\bar{Q}_{\text{МАЛ}} = 0,78 \bar{Q} + 0,0522$
VI. Басейн Річок Причорномор'я	0,1-0,7	1,3-2,9	-	-
VII. Річковий басейн Дону	0,6-130	0,28-0,58	при $\bar{Q} \geq 1,2 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$	
			$\bar{Q}_{\text{БАГ}} = 1,1038 - 0,0028$	$\bar{Q}_{\text{МАЛ}} = 0,881 \bar{Q} + 0,1343$
VIII. Басейн річок Приазов'я	0,4-11,0	0,26-0,66	при $\bar{Q} \geq 0,2 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$	
			$\bar{Q}_{\text{БАГ}} = 1,022 + 0,1798$	$\bar{Q}_{\text{МАЛ}} = 0,9706 \bar{Q} - 0,1794$
IX. Басейн річок Криму	0,03-2,1	0,29-2,26	-	-

реднім річним стоком води у багатоводну та маловодну фази водності, що мають високі показники щільності зв'язку (коефіцієнти апроксимації  $R^2=0,99$ ). Чим більшою є норма річного стоку на річках, тим більшою є різниця в стоці між фазами

водності. Отримані рівняння можна використати для прогнозування стоку води. Узагальнення рівнянь регресії для прогнозування стоку води подано в таблиці 4.

Зазначимо, що при використанні запропоно-

Таблиця 5  
Ймовірні відхилення розрахункових величин середнього річного стоку води для багатоводних та маловодних фаз водності в межах районів річкових басейнів та суббасейнів

Річкові басейни	Ймовірне відхилення величин стоку води, %	
	багатоводна фаза	маловодна фаза
I. Річковий басейн Вісли	±14,2	±11,1
II. Річковий басейн Дунаю		
суббасейн Тиси	±7,6	±8,3
суббасейн Пруту і Сірету	±14,6	±10,8
III. Річковий Басейн Дністра		
лівобережжя	±14,1	±12,5
правобережжя	±10,3	±11,4
IV. Річковий басейн Південного Бугу	±15,4	±17,3
V. Річковий басейн Дніпра		
суббасейн Прип'яті	±14,3	±13,7
суббасейн Десни	±12,3	±12,6
суббасейн Середнього Дніпра	±15,2	±17,2
суббасейн Нижнього Дніпра	±19,4	±18,2
VI. Басейн Річок Причорномор'я	-	-
VII. Річковий басейн Дону	±17,3	±17,4
VIII. Басейн річок Приазов'я	±15,4	±17,8
IX. Басейн річок Криму	-	-

ваних рівнянь за малих значень норм середнього річного стоку води, стік в фазі водності за своїми величинами має незначні відмінності, а іноді вони переходять в область від'ємних значень. Тому в таблиці 4 наведено обмеження щодо застосування рівнянь. Наприклад, для суббасейну Тиси рівняння можна використовувати за нормою стоку води на річках при  $\bar{Q} \geq 0,2 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ . Якщо  $\bar{Q} < 0,2 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ , то стік води у фазі водності вважається рівним багаторічній нормі.

Середнє співвідношення між середнім річним стоком води річок у багатоводну та маловодну фазу водності змінюється в межах від ~1,3 до 1,5.

Ймовірні похибки визначення середніх витрат води (від 25 до 75% розподілу стандартного відхилення) [18, 24] у багатоводні та маловодні періоди узагальнено в таблиці 5.

Запропоновані рівняння регресії стоку води в маловодну чи багатоводну фазу від норм середнього річного стоку перевірено за даними спостережень попередніх років з визначенням показника ймовірності неперевищення допустимої похибки  $p$  у багатоводні та маловодні фази, що

визначається за формулою:

$$p = n / N \cdot 100\% \quad (1),$$

де  $n$  – кількість прогнозних оцінок, що не виходять за межі ймовірних відхилень,

$N$  – загальна кількість проведених оцінювань.

За результатами такої перевірки забезпеченість прогнозних оцінок для річок Українських Карпат (суббасейнів Тиси, Пруту і Сірету (басейн Дунаю) та правобережжя Дністра) для багатоводних періодів склала 94%, для маловодних – 78%, для річок рівнинних річкових басейнів та суббасейнів в середньому для багатоводних періодів склала 83%, для маловодних – 76%.

Отримані стохастичні закономірності багаторічної мінливості середнього річного стоку води можна використати для прогнозних оцінок можливих значень середнього річного стоку для будь-якої річки в межах районів річкових басейнів та суббасейнів (згідно схеми гідрографічного районування території України). Для цього необхідно за картою середніх річних модулів стоку річок

України [18, 21], або ж за попередньо отриманими залежностями середніх річних витрат води від площі водозборів для кожного району річкового басейну чи суббасейну [14, 18, 20] визначити середню річну витрату води для досліджуваної річки. Використовуючи інформацію з таблиць 3–5, можна передбачити величини середніх річних витрат води в багатоводні та маловодні фази водності і час їх настання.

### Висновки

Відповідно до виявлених стохастичних закономірностей багаторічних коливань середньорічного стоку води річок України (різницеви інтегральні криві, автокореляційні функції, критерії серій та їх довжини тощо), складено прогнозні оцінки змін стоку води до середини ХХІ століття. Завдяки аналізу просторової кореляційної матриці часових рядів середньорічного стоку річкових вод в межах України стало можливим виділити території з групами басейнів та суббасейнів річок із синхронними коливаннями стоку води. Перша група поєднує басейни річок Вісли, Дністра, суббасейнів Тиси, Пруту та Сірета (басейн Дунаю), суббасейнів Прип'яті (басейн Дніпра), друга група – басейни річок Південного Бугу, Дону, суббасейнів Десни, Середнього та Нижнього Подніпров'я (басейн Дніпра) та басейну річок Приазов'я.

Формалізація коливань стоку за даними спо-

стережень свідчить, що середньорічний стік води на річках першої групи має триваліші періоди циклів водності ( $29 \pm 2$  років), ніж у другій групі, де інтервали мають меншу тривалість ( $23 \pm 2$  років). Щодо фаз водності, то маловодна фаза для першої групи становить  $10 \pm 2$  роки, а для другої групи –  $8 \pm 2$  роки. Відповідно багатоводні фази на території річкових басейнів першої групи тривають  $17 \pm 2$  роки, а в межах басейнів річок другої групи –  $13 \pm 2$  роки.

З'ясовано, що для першої групи річкових басейнів маловодна фаза спостерігатиметься у 2021–2023 рр., слідом за нею настане багатоводна – 2038–2040 рр., що зміниться маловодною у 2049–2051 рр. Відповідно до виявлених стохастичних закономірностей, для другої групи річкових басейнів у 2020–2022 рр. розпочнеться багатоводна фаза, яка в 2034–2036 рр. зміниться маловодною, що триватиме до 2045–2047 рр.

Використовуючи ідентифіковані структурні елементи коливань (цикли та фази стоку), для кожного з басейнів та суббасейнів отримано співвідношення між середньорічним стоком води за багаторічний період та середньорічним стоком води у багатоводні та маловодні фази. Виявлено, що багатоводні фази за своєю водністю перевищують маловодні в середньому в 1,3–1,5 рази.

### References [Література]:

1. Van Gelder P.H.A.J.M., Kuzmin V.A., Visser P.J. (2000). Analysis and statistical forecasting of trends in river discharges under uncertain climate changes. In *River Flood Defence. Booklet 9*. F. Tönsmann, M. Koch. (eds). Kassel, Germany, 10 p.
2. Brockwell P.J., Davis R.A. (2003). *Introduction to Time Series and Forecasting*. New York, 437 p.
3. Lohre M., Sibbertsen P., Konnig T. (2003). Modeling water flow of the Rhine River using seasonal long memory. *Water Resources Research*, 39, 1132.
4. Rao A.R., Hamed K. (2003). Multi-taper method of analysis of periodicities in hydrologic data. *Journal of Hydrology*, 279, 125–143.
5. Brazdil R., Tam T.N. (1990). Climatic changes in the instrumental period in central Europe. In *Climatic Change in the Historical and the Instrumental Periods*. Brno, p. 223 – 230.
6. Walanus A. Soja R. (1995). The 3-5 yr period in river runoff – is it random fluctuation? In *Proceedings, Hydrological Processes in the Catchment*. Cracow, p.141 – 148.
7. Sosedko M. (1997). Regular alternation of high and low streamflow periods in the river basin of the Carpathians. *Annales Geophysicae*, 15, (Part II, Supplement II). P. 310.
8. Luk'yanets O., Sosedko M. (1998). Die Abflussbewertung auf nächste Jahre in den Karpaten unter Berücksichtigung der mehrjährigen Abflussschwankungen. *XIX. Konferenz der Donauländer. Osijek (Kroatien)*, 393–401.
9. Pekarova P., Miklanek P., Pekar J.. (2003). Spatial and temporal runoff oscillation analysis of the main rivers of the world during the 19th–20th centuries. *Journal of Hydrology*, 274, 62–79.
10. Pekarova P, Miklanek P. (2004). Occurrence of the dry periods in European runoff series. In *XXII Conference of the Danubian Countries*. Brno (CD ROM).

11. Rao A.R., Hamed K. (2003). Multi-taper method of analysis of periodicities in hydrologic data. *Journal of Hydrology*, 279, 125–143.
12. Lukianets O.I., Kaminska T.P. (2015). Regularities and spatial synchronicity of perennial cyclic fluctuations of water runoff of rivers of the Ukrainian Carpathians. *Scientific Bulletin of Chernivtsi University: a collection of scientific papers..* Iss. 744–745. Geography, 18–24. [In Ukrainian].  
[Лук'янець О.І., Камінська Т.П. Закономірності та просторова синхронність багаторічних циклічних коливань водного стоку річок Українських Карпат. Науковий вісник Чернівецького університету: збірник наукових праць. 2015. Вип. 744–745. Географія. С. 18–24]
13. Lukianets Olga (2017). Stochastic regularities of long-term fluctuation of average annual runoff of rivers of Tisza river basin (within the Ukraine). In *XXVII Conference of the Danubian Countries*, Golden Sands, Bulgaria. 280–290.
14. Oleksandr Obodovskyi, Olga Lukianets (2017). Patterns and Forecast of Long-term Cyclical Fluctuations of the Water Runoff of Ukrainian Carpathians Rivers. *Scientific Journal of Environmental Research, Engineering and Management*, 73, 1., 33–47.
15. Khristoforov A.V. (1994). *Theory of random processes in hydrology*. Moscow, 143 p. [In Russian].  
[Христофоров А. В. Теория случайных процессов в гидрологии. Москва, 1994. 143 с.]
16. Khristoforov A.V. (1993). *Reliability of river runoff calculations*. Moscow, 166 p. [In Russian].  
[Христофоров А. В. Надежность расчетов речного стока. Москва, 1993. 166 с.]
17. Rozhdestvensky A.V., Chebotaev A.I. (1974). *Statistical methods in hydrology*. Leningrad, 356–415. [In Russian].  
[Рождественский А.В., Чеботаев А. И. Статистические методы в гидрологии. Ленинград, 1974. С. 356–415.]
18. Grebin V., Didovets I., Korniienko V., Korohoda N., Kryvets O., Kuprikov I., Lukianets O., Obodovskyi O., Onyschuk V., Pochaievets O., Snizhko S., Shevchenko O. (2020). *River Runoff in Ukraine Under Climate Change Conditions*. Monograph, O. Obodovskyi (ed.). LAP Lambert Academic Publishing, 180 p.
19. Kartvelishvili N.A. (1975). *Stochastic Hydrology*. Leningrad, 162 p. [In Russian].  
[Картвелишвили Н. А. Стохастическая гидрология. Ленинград, 1975. 162 с.]
20. Obodovskyi O., Lukyanets O., Moskalenko S., Korniienko V. (2019). Generalization of the average annual water runoff of the rivers according to the hydrographic zoning of Ukraine. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology*, 51, 158–170 [In Ukrainian].  
[Ободовський О., Лук'янець О., Москаленко С., Корнієнко В. Узагальнення середнього річного стоку води річок відповідно до гідрографічного районування України // Вісник Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія». 2019. №5.1 С. 158–170.]
21. Lukianets O. I., Obodovskyi O. G., Grebin V.V., Pochaievets O. O., Korniienko V. O. (2021). Spatial regularities of change in average annual water flow of river of Ukraine. *Ukrainian geographic journal*, 1, 6–14. DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2021.01.006> [In Ukrainian].  
[О.І. Лук'янець, О.Г. Ободовський, В.В. Гребін, О.О. Почаєвець, В.О. Корнієнко. Просторові закономірності зміни середнього річного стоку води річок України // Укр. геогр. журн. 2021. №1. С. 6–14. DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2021.01.006>]
22. Grebin V.V., Obodovskyi O.G., Zhovnir V.V., Mudra K.V., O. Pochaievets O.O. (2019). Estimation of the homogeneity of series of flow characteristics of rivers in the areas of river basins and sub-basins of Ukraine. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 1(52), 36–50 [In Ukrainian].  
[Гребін В.В., Ободовський О.Г., Жовнір В.В., Мудра К.В., Почаєвець О.О. Оцінювання однорідності рядів стокових характеристик річок районів річкових басейнів та суббасейнів України // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія, 2019. № 1(52). С. 36–50.]
23. Moskalenko S. O., Malytska L. V. (2020). Spatial correlation function of the mean annual water runoff of the river of Ukraine. *Conference Proceedings, Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*, 1, 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo119>.
24. Kushlyk-Divulska O.I., Polishchuk N.V., Orel B.P., Shtabalyuk P.I. (2010). *Probability theory and mathematical statistics*. Kyiv, 136 p. [In Ukrainian].  
[Кушлик-Дивульська О.І., Поліщук Н.В., Орел Б.П., Штабальук П.І. Теорія ймовірностей та математична статистика. Київ, 2010. 136 с.]

Стаття надійшла до редакції 28.06.2021