

ОЦІНКА ВПЛИВУ ПОСУХ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕЖЕННОГО СТОКУ РІЧКИ САВРАНКА

Оцінено характеристики посушливості (індекс SPEI) та стоку у період літньо-осінньої межені на прикладі р.Савранка. За допомогою моделі множинної лінійної регресії з покроковим вибором предикторів встановлені зв'язки між показниками меженого стоку та посух.

Ключові слова: посуха, характеристики стоку межені, індекс посушливості SPEI, множинна регресія

Вступ. Метеорологічна посуха є періодом, який характеризується нестачею опадів у порівнянні з нормою впродовж тривалого часу при підвищеній температурі повітря, в результаті чого виснажуються запаси вологи у ґрунті і складаються несприятливі умови для розвитку рослин [8]. Посуха впливає як на поверхневі, так і підземні води й може призвести до дефіциту води, погіршення її якості, порушення стану прибережного середовища й призупинення рекреаційної діяльності.

Гідрологічна посуха є досить тривалим періодом сухої погоди, який спричиняє нестачу споживання води через зменшення стоку (нижче установлених норм) та зменшення вмісту вологи в ґрунті й зростання глибини залягання дзеркала підземних вод [6]. Гідрологічна посуха може тривати більше одного року і захоплювати більше одного водозбору, вона зазвичай настає із запізненням по відношенню до метеорологічної та сільськогосподарської посух. Виявлення зв'язку гідрологічних посух з показниками зволоженості / посушливості досліджуваних водозборів часто ускладнюється одночасним впливом на гідрологічні характеристики природних та антропогенних чинників підстильної поверхні, таких як вирубка лісу, деградація земель, створення ставків та водосховищ, вилучення води на господарські потреби та інше.

Посухи пов'язані з установленням межені на річках. Дослідження меженого стоку значно ускладнюється відсутністю узгоджених методів його визначення і аналізу. Це стосується і самого формулювання поняття "межень". На даний момент дослідники погодилися тільки з дуже загальним формулюванням: "Основна характеристика межені - зменшення кількості води в певний момент часу на певній території". Літньо-осіння межень визначається як "період аномально посушливої погоди протягом досить тривалого періоду часу для того, щоб відсутність опадів спричинила серйозні гідрологічні порушення і призвела до виникнення дефіциту вологи з точки зору використання води людиною" [1].

У роботі [9] говориться, що основна риса межені - дефіцит води для певних цілей. Низький стік зазвичай спостерігається в межень, але він відображає лише один її елемент - безпосередньо величину (глибину) межені. Таким чином, аналіз меженого стоку спрямований на розуміння фізики процесу формування мінімального стоку в конкретній точці за короткий відрізок часу (щоденне значення). Аналіз гідрологічної межені в умовах дефіциту стоку проводиться за сезон і в просторі.

Дуже часто в роботах зарубіжних дослідників відмінності між меженню і низьким стоком не робиться через те, що індекс низького стоку береться як єдина кількісна характеристика межені в конкретній точці [1].

У меженому періоді виділяють відрізок часу, коли стік є найменшим. Період найменшого стоку тривалістю до 30 діб (місяць) називають періодом мінімального стоку. У цей період річки живляться практично лише підземними водами [2].

Посуха, як стихійне метеорологічне явище, найбільше впливає на характеристики мінімального стоку річок літньої межени, оскільки за умов довготривалої відсутності опадів стік річок формується лише за рахунок надходження до русла підземних вод з водоносних горизонтів. У свою чергу, запаси підземних вод, які живлять річку у період межени, за наявності метеорологічної посухи також виснажуються, що призводить до її пересихання. У деяких публікаціях [11] термін "оперативна посуха" застосовується до межени, яка є наслідком природної нестачі води і певних управлінських рішень, коли дефіцит води відбивається на потребах споживачів води.

В основу більшості досліджень покладено уявлення про мінімальний стік як про показник дефіциту води відносно заданого "порогового" значення витрати. Такий підхід набув широкого застосування у роботах вчених Західної Європи та США [10]. Показниками дефіциту води можуть бути дані про тривалість пересихання річок, "тривалість стояння" заданої витрати води, а також характеристики мінімального стоку річок (мінімальний середній місячний стік, мінімальний добовий стік, мінімальні 30-ти добові витрати води, середні багаторічні значення розглядуваних показників та відповідні значення заданої забезпеченості). Часто у гідрологічних розрахунках використовуються характеристики мінімального стоку із забезпеченістю 66,7% і більше, найчастіше 80%

Метою роботи є пошук зв'язків між характеристиками літньо-осінньої межени та показниками метеорологічної посухи для Північно-Західного Причорномор'я. Оскільки більшість річок цієї території пересихає у дуже маловодні роки, як розрахункова розглядалася забезпеченість стоку, що дорівнює 75%.

Об'єктом дослідження є стік річки Савранка з площею водозбору $F=1740$ км². Річка протікає територією Одеської та Вінницької областей, впадає в р. Південний Буг.

Предметом дослідження є характеристики стоку річки у період літньо-осінньої межени та показники метеорологічної посухи.

Матеріали та методи. Розглянуті ряди середнього місячного стоку літньо-осінньої межени (травень-жовтень) та ряди мінімального добового стоку на р.Савранка-с.Осички за період 1953-2011 рр., а також дані про середньомісячні температури повітря та суми опадів на метеостанції Любашівка за період 1962-2011 рр.

1989 рік, за В.В. Гребінем [3], виділяється як межа, починаючи з якої вплив змін клімату в результаті глобального потепління на стік річок України став значущим. Отже, побудова рівнянь множинної регресії відбувалася на базі даних за 1989-2011 рр.

Для встановлення просторово-часової мінливості посух використано багатомасштабний індекс посушливості - стандартизований індекс опадів і сумарного випаровування SPEI [5,12], впроваджений в міжнародну практику з 2009 року. У розрахунку SPEI використовуються дані про різницю між щомісячними (або щотижневими) опадами і потенційним випаровуванням.

Для дослідження зв'язків між характеристиками літньо-осінньої межени та показниками посухи використано метод множинної лінійної регресії з покроковим вибором оптимальних предикторів [4].

Математична модель множинної лінійної регресії має вигляд

$$\tilde{y}_i - \bar{y} = b_1(x_{1i} - \bar{x}_1) + b_2(x_{2i} - \bar{x}_2) + b_3(x_{3i} - \bar{x}_3) \dots + b_k(x_{ki} - \bar{x}_k), \quad (1)$$

де $\tilde{y}_i - \bar{y}$ - центровані значення залежної величини (предиктанта); $x_{ji} - \bar{x}_j$ - центровані значення j -го аргументу (предиктора); $b_1, b_2, b_3, \dots, b_k$ - коефіцієнти рівняння множинної лінійної регресії; k - число предикторів.

Модель множинної регресії з покроковим вибором предикторів розроблялася з метою виділення основних чинників, які визначають процес формування мінімального стоку у період літньо-осінньої межени. Предиктантами в моделі множинної лінійної регресії бралися середні місячні витрати води Q_m за період літньо-осінньої межени, мінімальні добові витрати води $Q_{min,d}$ для кожного місяця межени, а також тривалість періоду, коли фактичні витрати води були нижчими за витрати води Р-ої забезпеченості $t_{Q < Q_p}$. Як потенціальні предиктори, використовувалися середньомісячні та мінімальні добові витрати води, суми опадів, температура повітря, індекс посушливості SPEI, індекс Північно-Атлантичного колювання (ПАК), кількість днів у місяці з температурою, вищою за 15°C. При побудові регресійних моделей предиктори бралися із різним зсувом у часі (від 1 до 2 місяців).

Аналіз результатів. Савранка була обрана для досліджень як така річка Північно-Західного Причорномор'я, яка має стійке підземне живлення і не пересихає. Живлення річки здійснюється із водоносних горизонтів кристалічних порід і малодобітних горизонтів в покривних відкладах [7].

Початок літньо-осінньої межени на р. Савранка припадає на травень, кінець – на жовтень-листопад. Літньо-осіння межень переходить у зиму. Початок зимового сезону відноситься до грудня, кінець - на лютий. Літньо-осіння та зимова межени можуть перериватися паводками (рис.1).

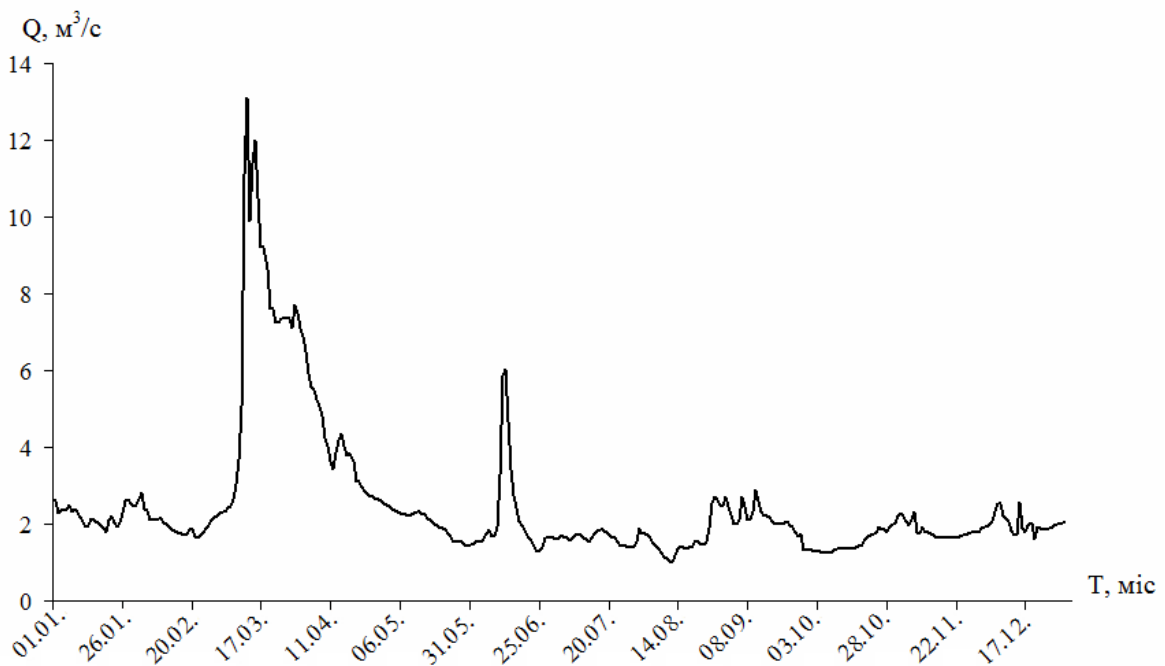


Рис. 1 – Гідрограф стоку (р.Савранка – с.Осички, 1986 р.)

За даними В.В. Гребіня [3], у період з 1989 р. зростають показники мінімального стоку річок. Це підтверджується і у нашому дослідженні. Аналіз характеристик літньо-осінньої межени для р.Савранка показав, що в порівнянні з періодом 1953-1988 рр., в 1989-2011 рр. величини мінімальних місячних витрат води $Q_{min,m}$ збільшилися на 24%, мінімальних добових витрат води $Q_{min,d}$ – на 27%, мінімальні 30-добові витрати води $Q_{min,30}$ – на 16% (табл. 1).

Середня квадратична відносна похибка $\varepsilon_{\bar{Q}}$ визначення середньобагаторічних характеристик літньо-осінньої межені за весь період спостережень (1953-2011 рр.) становить 7,6 – 9,1%, у той час як допустима похибка визначення середньої величини складає 15% для гідрологічної зони недостатнього зволоження. Точність визначення коефіцієнтів варіації C_V також є задовільною.

Таблиця 1 – Оцінки статистичних параметрів характеристик стоку за період літньо-осінньої межені, визначені за даними рядів спостережень на р.Савранка-с.Осички (1953-2011 рр.)

Період	Характеристика	\bar{Q} , м ³ /с	$\varepsilon_{\bar{Q}}$, %	C_V	ε_{C_V} , %	C_S	C_S / C_V	$Q_{P=75\%}$
1953-2011	$Q_{\min,м}$	1,12	7,6	0,58	10,4	0,17	0,3	0,67
	$Q_{\min,д}$	0,76	9,1	0,70	10,9	0,46	0,7	0,38
	$Q_{\min,30}$	1,00	8,1	0,62	10,6	0,31	0,5	0,57
1953-1988	$Q_{\min,м}$	1,02	10,8	0,65	13,4	0,20	0,3	0,56
	$Q_{\min,д}$	0,66	12,8	0,77	14,0	0,43	0,6	0,30
	$Q_{\min,30}$	0,93	11,2	0,67	13,5	0,26	0,4	0,50
1989-2011	$Q_{\min,м}$	1,26	10,2	0,49	15,8	0,27	0,5	0,83
	$Q_{\min,д}$	0,91	12,5	0,60	16,2	0,50	0,8	0,52
	$Q_{\min,30}$	1,11	11,5	0,55	16,0	0,49	0,9	0,67

Вигляд різницево-інтегральних кривих літньо-осінньої межені дозволяє зробити висновок, що досліджувані характеристики з 1969 р. до 2005 р. знаходилися у додатній (багатоводній) фазі коливаль, з 2005 р. відзначається тенденція до спаду (рис.2).

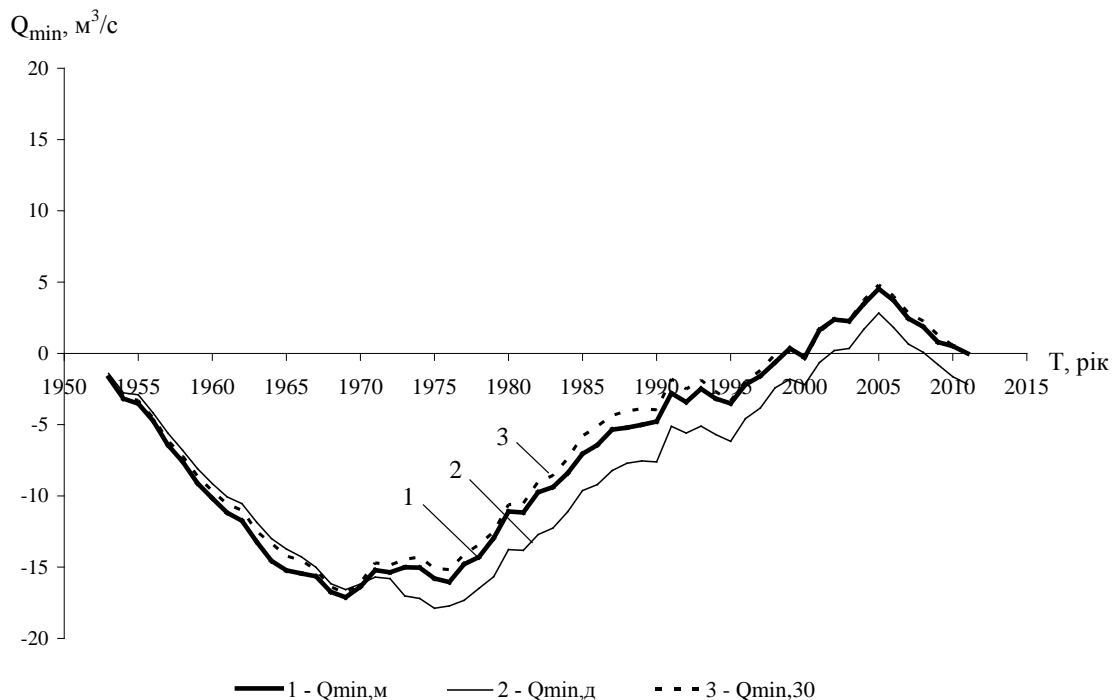


Рис. 2 – Різницево-інтегральні криві характеристик меженного стоку (р.Савранка-с.Осички, 1953-2011 рр.)

Розрахунки індексів SPEI проводилися за допомогою електронного ресурсу для метеостанції Любашівка, з використанням даних про середні місячні температури повітря, середні місячні суми опадів та відомостей про географічні координати метеостанції. За установленими індексами SPEI приймалося рішення про категорію посухи (табл.2).

Таблиця 2 – Класифікація значень SPEI

Значення SPEI	Категорія періоду	Категорія посухи
$SPEI \geq 2,00$	Вкрай вологий	
$1,50 \leq SPEI \leq 1,99$	Дуже вологий	
$1,00 \leq SPEI \leq 1,49$	Помірно вологий	
$0 \leq SPEI \leq 0,99$	Близький до нормального	
$0 \geq SPEI \geq -0,99$	Близький до нормального	Слабка посуха
$-1,00 \geq SPEI \geq -1,49$	Помірно сухий	Помірна посуха
$-1,50 \geq SPEI \geq -1,99$	Дуже сухий	Інтенсивна посуха
$SPEI \leq -2,00$	Вкрай сухий	Екстремальна посуха

У хронологічному ході значень індексів SPEI за період 1962 - 2011 рр. було зареєстровано 17 випадків посух різної тривалості та інтенсивності. Емпірична ймовірність появи екстремальних посух ($SPEI \leq -2,00$) становить 2%, інтенсивних посух ($-1,50 \geq SPEI \geq -1,99$) – 6%, помірних посух ($-1,00 \geq SPEI \geq -1,49$) – 13%. На досліджуваній території метеорологічні посухи переривалися помірно вологими періодами та періодами близькими до нормального зволоження (рис.3).

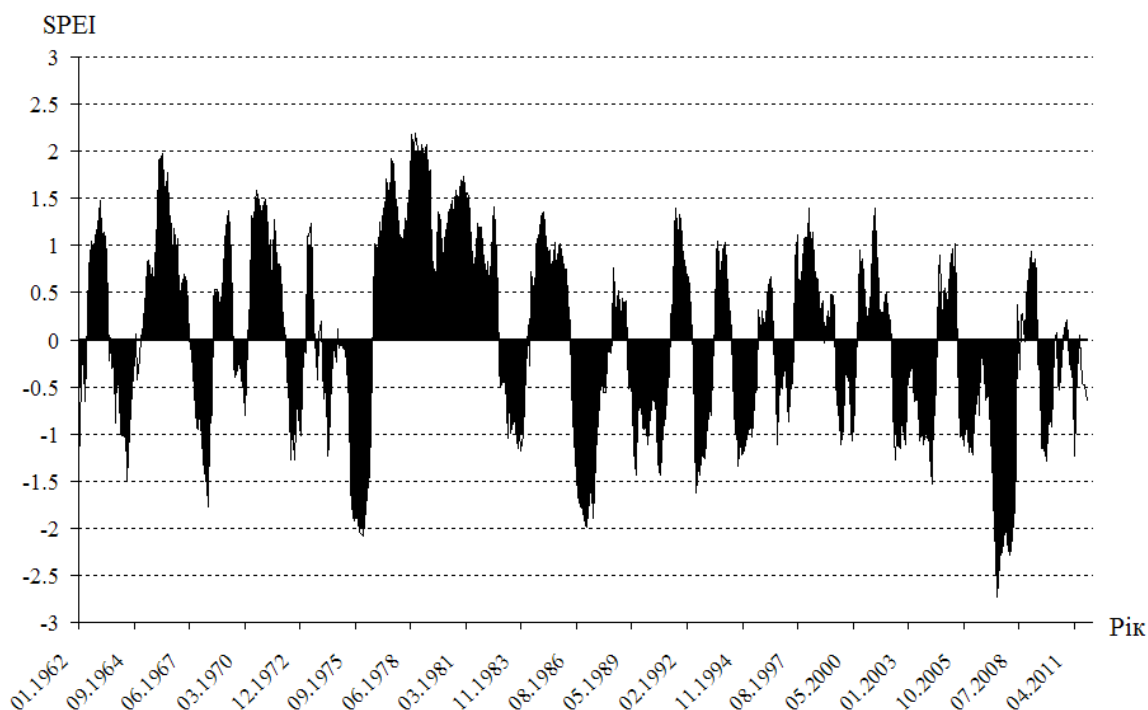


Рис. 3 – Хронологічний хід індексів посушливості SPEI (м. Любашівка, 1962-2011рр.)

Починаючи з 1989 р., емпірична ймовірність появи помірних посух зростає до 17%. У період з травня 2007 р. по квітень 2008 р. відбулася екстремальна посуха із $SPEI \leq -2,00$. Варто зазначити, що в період цієї екстремальної посухи малими були всі характеристики меженного стоку: $Q_{min,m} = 0,29 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_{min,d} = 0,14 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_{min,30} = 0,28 \text{ м}^3/\text{с}$, які є значно меншими за величини \bar{Q} та Q_p , представлені у табл.1.

На основі застосування методу покровокого вибору предикторів встановлено, що основними чинниками формування стоку літньо-осінньої межени є середня місячна або мінімальна добова витрата та індекс SPEI за попередній розрахунковий місяць.

Дослідження показали, що зв'язки розглянутих предиктантів із індексами ПАК, опадами попередніх місяців хоча і є статистично значущими, але тіснота лінійних зв'язків не є достатньою ($R = 0,25 \div 0,35$)

Загальний вигляд розроблених розрахункових залежностей є таким:

$$Q_{m,i} = a_0 + a_1 Q_{m,i-1} + a_2 SPEI_{i-1}; \quad (2)$$

$$Q_{min,d,i} = b_0 + b_1 Q_{min,d,i-1} + b_2 SPEI_{i-1}; \quad (3)$$

$$t_{Q < Q_p,i} = c_0 - c_1 Q_{m,i-1} + c_2 SPEI_{i-1}, \quad (4)$$

де Q_m – середня місячна витрата води, $\text{м}^3/\text{с}$; $Q_{min,d}$ – мінімальна добова витрата води, $\text{м}^3/\text{с}$; $t_{Q < Q_p}$ – тривалість періоду, коли витрати води були нижчими за витрати Q_p за забезпеченості, д; $SPEI$ – індекс посушливості; i – номер календарного місяця.

З визначених залежностей випливає, що витрата попереднього місяця $Q_{m,i-1}$ характеризує водність річки, яка забезпечується у період літньо-осінньої межени підземним живленням. По мірі зростання цієї величини збільшується витрата води наступного місяця й зменшується тривалість часу, у межах якого добові витрати будуть меншими від заданого порогу.

Індекс SPEI у період літньо-осінньої межени набирає від'ємних значень. Зростання SPEI за абсолютної величиною зумовлює зменшення характеристик меженного стоку та збільшує тривалість стояння малих витрат води.

Найбільш тісні кореляційні зв'язки визначені для місяців червень, липень та серпень, для яких коефіцієнт множинної кореляції $R > 0,75$. Для вересня та жовтня визначені коефіцієнти множинної кореляції зменшуються до 0,45. Покращити точність розрахунків у ці місяці можливо за рахунок використання опадів не попереднього, а поточного місяця. Наприклад, для вересня одержані такі рівняння:

$$Q_{min,d_{IX}} = 0,782 + 0,559 Q_{min,d_{VIII}} + 0,053 SPEI_{VIII}, R=0,67; \quad (5)$$

$$Q_{min,d_{IX}} = 0,430 + 0,601 Q_{min,d_{VIII}} + 0,047 SPEI_{VIII} + 0,006 X_{IX}, R=0,74, \quad (6)$$

де X_{IX} – сума опадів у вересні, мм.

Введення у регресійну модель додаткового предиктора X_{IX} значуще поліпшує її якість. Проте використання у моделі опадів поточного (розрахункового) місяця обмежує придатність регресійної моделі до прогнозування.

Запропонована структура регресійної моделі із використанням таких предикторів, як водність та індекс SPEI попередніх місяців, представлених рівняннями (2) – (4) може бути використана для прогнозування характеристик мінімального стоку. Наприклад, для червня місяця з метою визначення мінімального добового стоку отримане регресійне рівняння виду

$$Q_{min, \partial_{VI}} = 0,274 + 0,759Q_{min, \partial_V} + 0,162SPEI_V, R=0,80 \quad (7)$$

де $Q_{min, \partial_{VI}}$ - мінімальна добова витрата води у червні, м³/с; Q_{min, ∂_V} - мінімальна добова витрата води у травні, м³/с; $SPEI_V$ - індекс посушливості у травні.

Перевірочні прогнози за цим рівнянням (табл.3) виконані за період 1982-2011 рр. показали, що середнє квадратичне відхилення прогнозованої величини σ дорівнює 1,66. Допустима похибка (Н.Ф. Бефані, Г.П. Калінін, 1983), визначена як $\delta_{доп}=0,674 \sigma$, становить 1,12.

Мірою точності прогностичної методики слугує середня квадратична похибка перевірочних прогнозів

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y - y')^2}{n}}, \quad (8)$$

де y – фактичне значення величини; y' – фактичне значення величини; n – число членів ряду.

Критерієм якості методики приймається відношення S/σ , яке для даного випадку дорівнює 0,27, тобто якість прогнозу розглядається як «добра».

Таблиця 3 – Перевірочні прогнози визначення мінімальних добових витрат води у червні з використанням рівняння (7) (р.Савранка – с.Осички, 1982-2011 рр.)

Рік	$Q_{min, \partial_V}, \text{м}^3/\text{с}$	$SPEI_V$	$Q_{min, \partial_{VI} \text{ факт.}}, \text{м}^3/\text{с}$	$Q_{min, \partial_{VI} \text{ прогн.}}, \text{м}^3/\text{с}$	$\delta, \text{м}^3/\text{с}$
1	2	3	4	5	6
1982	2,79	0,55	2,5	2,48	0,02
1983	2,35	-0,53	1,54	1,97	-0,43
1984	2,23	-0,28	2,03	1,92	0,11
1985	2,69	0,95	2,89	2,47	0,42
1986	1,44	0,16	1,3	1,39	-0,09
1987	1,6	-1,57	1,9	1,23	0,67
1988	1,87	-0,15	1,72	1,67	0,05
1989	1	-0,43	0,86	0,96	-0,10
1990	1,16	-0,8	1,49	1,02	0,47
1991	2,28	0,24	2,16	2,04	0,12
1992	1,75	0,28	1,64	1,65	-0,01
1993	1,64	-0,8	1,34	1,39	-0,05
1994	0,44	0,1	0,77	0,62	0,15
1995	1,22	-1,03	1,1	1,03	0,07
1996	2,06	0,46	1,66	1,91	-0,25
1997	1,9	-0,44	1,18	1,64	-0,46
1998	1,54	1,14	2,01	1,63	0,38
1999	1,77	0,46	1,91	1,69	0,22
2000	0,77	-1,07	0,57	0,69	-0,12
2001	2,83	1,07	3,87	2,60	1,27
2002	1,9	-0,74	1,86	1,60	0,26
2003	1,19	-0,47	1,16	1,10	0,06
2004	2,25	-0,61	2,1	1,88	0,22
2005	2,99	0,55	1,39	2,63	-1,24
2006	2,58	-0,78	1,48	2,11	-0,63

Продовження табл. 3

1	2	3	4	5	6
2007	0,59	-2,01	0,38	0,40	-0.02
2008	1,1	-1,77	1,05	0,82	0.23
2009	0,96	0,86	0,34	1,14	-0.80
2010	1,12	-0,02	0,83	1,12	-0.29
2011	0,84	-1,24	0,49	0,71	-0.22
Сер.					0.31

Висновки. Отримані для р. Савранка результати показали, що індекс посушливості SPEI може успішно застосовуватись як статистично значущий предиктор у моделях множинної регресії, які описують процес форсування меженного стоку.

Запропонована структура регресійних моделей може бути використана для побудови діагностичних та прогнозних методик визначення характеристик меженного стоку річок Північно-Західного Причорномор'я.

Список літератури

1. Болгов М.В., Мишон В.М., Сенцова Н.И. Современные проблемы оценки водных ресурсов и водообеспечения. – М.: Наука, 2005. - 318 с.
2. Владимиров А.М. Гидрологические расчёты. – Л.: Гидрометеоздат, 1990. – 366 с.
3. Гребінь В.В. Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз). –К.: Ніка-центр, 2010. - 316 с.
4. Лобода Н.С. Методи статистичного аналізу у гідрологічних розрахунках і прогнозах: Навч. посібник. – Одеса: Екологія, 2010. – 184 с.
5. Лобода Н.С., Божок Ю.В. Шляхи визначення можливої гідрологічної посухи за метеорологічними даними в умовах змін клімату для річок північно-західного Причорномор'я // Геополітика та екогеодинаміка регіонів: Науковий журнал – м. Сімферополь, 2014. – Т.10. – Вип.1 – С. 281-289.
6. Международный гидрологический словарь. - 2-е изд. - Женева: ВМО, 1992. - 414 с.
7. Ресурсы поверхностных вод СССР. Украина и Молдавия. Т. 6. Вып. 1. Зап. Украина и Молдавия. – Л.: Гидрометеоздат, 1960. – 882 с.
8. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. – 3-е издание. – Л.: Гидрометеоздат, 1974. – 568 с.
9. Beran M., Rodier J.A. Hydrological aspects of droughts. P.: UNESCO-WMO, 1985. (studies and reports in hydrology; N 39).
10. Dracup, J.A., Lee, K.S. & Paulson, E.G.Jr. On the definition of droughts // Water Resour. Res. – 1980, 16(2). – P.297-302
11. Hisdal H., Tallaksen L.M. Drought event definition (Techn. Rep. to the ARIDE Project). - Oslo, 2000. - N6. – 41 p.
12. Sergio M. Vicente-Serrano, Santiago Begueri´A, Juan I. Lo´Pez-Moreno. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index // Journal of climate. – 2010. – P.1696-1718

Оценка влияния засух на характеристики меженного стока реки Савранка. Божок Ю.В., Лобода Н.С.

Оценены характеристики засушливости (индекс SPEI) и стока в период летне-осенней межени на примере р.Савранка. С помощью модели множественной линейной регрессии с пошаговым выбором предикторов установлены связи между показателями меженного стока и засухи.

Ключевые слова: засуха, характеристики стока межени, индекс засушливости SPEI, множественная регрессия

Assessment of the impact of droughts on the low flow characteristics of Savranka River. Bozhok Y.V., Loboda N.S.

Characteristics of aridity (index SPEI) and characteristics of flow during the summer-autumn low water period on the example Savranka River are estimated. Using multiple linear regression model with stepwise selection of predictors links between established of low flow and drought are established.

Keywords: drought, low water flow characteristics, index of aridity SPEI, multiple regression