

УДК 551.49

*Лобода Н.С., Хохлов В.М., Божок Ю.В.*

*Одеський державний екологічний університет*

**ОЦІНКА ХАРАКТЕРИСТИК ПОСУШЛИВОСТІ ЗАКАРПАТТЯ У  
СУЧАСНИХ ТА МАЙБУТНІХ УМОВАХ  
(ЗА СЦЕНАРІЄМ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛІННЯ)**

*Ключові слова: посуха; індекси посушливості; Закарпаття*

**Актуальність.** Посуха – це природне явище і невід’ємна частина мінливості клімату. Посухи трапляються всюди і значну нестачу води, проте їх властивості значно відрізняються в залежності від кліматичної зони. Аналіз часто обмежується якісною оцінкою, характеристики посух і їх наслідки можуть змінюватися в різних кліматичних зонах. В посушливих районах дефіцит опадів впливає на водні ресурси і, у багатьох випадках, метеорологічні посухи спричиняють гідрологічні і екологічні посухи.

Поняття «посуха» відрізняється від поняття «посушливість», яка використовується для опису клімату районів малою кількістю опадів і розглядається як постійна особливість клімату. Посухи – це підступні екстремальні гідрологічні і кліматологічні явища, які негативно впливають на соціальну, економічну, культурну і інші функції виділених територій протягом тимчасових періодів. Виникнення «жорстоких» посух, особливо тих, що тривають декілька сезонів або декілька років підряд, часто приводить до серйозних економічних, екологічних і соціальних наслідків [6].

Існує декілька класифікацій посухи серед різних дисциплін. Популярна і прийнята у всьому світі дисциплінарна перспективна класифікація, яка розділяє посухи на метеорологічну, гідрологічну, сільськогосподарську і соціо-економічну. *За метеорологічну посуху* вважають період, коли річна кількість опадів менша, ніж середня багаторічна кількість [6]. Якщо метеорологічна посуха довгий час, вона породжує *гідрологічну посуху*, для якої характерне зменшення руслового стоку і запасів підземних вод. *Сільськогосподарська посуха* відбувається, коли водозабезпеченість ґрунту для сільгоспкультур скорочується до рівня, при якому виникають негативні впливи на урожай зерна і, як наслідок, на сільськогосподарське виробництво в регіоні. Нарешті, *соціо-економічна посуха* супроводжується довгим періодом метеорологічної і/або гідрологічної посухи; вона впливає на людські життя і викликає голод і інтенсивну міграцію.

*Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2011. – Т.2(23)*

Моніторинг є ключовим чинником управління посухами і ризиками, особливо в регіонах, схильних до посух. Це явище, визнане одним з найбільших екологічних ризиків, привернуло увагу фахівців з проблем навколишнього середовища, екологів, гідрологів, метеорологів та ін. Було здійснено безліч спроб проведення аналізу і моніторингу посух. Дж. Дрейкап – один з тих піонерів, які визначили характеристики і ознаки посух [8]. На його переконання, явище посухи повинне складатися з трьох визначальних ознак, таких як тривалість, ступінь тяжкості і масштаб. Аналіз частоти цього явища з погляду тривалості, ступеню тяжкості і масштабу складний, оскільки кожен з цих параметрів може мати власний розподіл ймовірностей [6]

**Метою роботи** є визначення індексу посушливості в умовах глобального потепління з використанням даних сценаріїв глобального потепління.

**Стан проблеми.** Всі існуючі індекси посух засновані на порівнянні наявних запасів води (причому основною складовою є опади) з втратами води на випаровування, яке визначається через приплив радіації або через температуру повітря чи інші кліматичні змінні. Один з перших і, найпростіших індексів був запропонований Мартонні. Цей індекс  $\alpha$  визначається за великий проміжок часу і виражається таким чином:

$$\alpha = \frac{X}{10 + T}, \quad (1)$$

де  $X$  – середньорічні опади, мм;  $T$  – середньорічна температура повітря, °С. Значення  $\alpha < 15$  характерні для аридних зон.

Індекс Кеппена також заснований на простих кліматичних змінних. За допомогою цього індексу надійніше визначалися пустельні і степові зони в порівнянні з аридними і напіваридними зонами. Вираз для індексу Кеппена так само, як і для індексу Мартонні, є дуже простим, але таким, що має один недолік: він не враховує добову і сезонну мінливість температури повітря в аридних зонах. Більш точне визначення посушливості запропоноване С. Торнтвайтом [7]. У цьому визначенні використовується концепція потенційного випаровування, або потенційної евапотранспірації ( $PET$ ), під цією величиною розуміється та максимальна кількість води, яка могла б випаруватися в даних кліматичних умовах з поверхні суші, покритою рослинністю, за наявності достатнього запасу води.  $PET$  по формулі Торнтвайта виражається як функція сум температур за 12 місяців. Якщо кількість середньорічних опадів менше  $PET$ , то район дослідження визначається як найменше напіваридний [3].

Для того, щоб отримати більш виразне визначення посушливості, М.І. Будико [1] запропонував радіаційний індекс аридності ( $PIA$ ), котрий враховує радіаційне тепло, яке надходить до поверхні суші і визначається відношенням  $PIA$

$$PIA = \frac{R}{IP}, \quad (2)$$

де  $R$  — радіаційний баланс на рівні земної поверхні;  $IP$  — теплота, необхідна для випаровування річних опадів  $X$ ;

Значення  $2 < PIA < 3$  характерні для напіваридних районів,  $PIA > 3$  — для пустель.

По формулі ЮНЕСКО [10], розробленої на основі формули Пенмана, ступінь аридності визначається по наступних співвідношеннях:

$$\begin{aligned} X/PET < 0,03 & \text{ – гіпераридна зона,} \\ 0,03 < X/PET < 0,20 & \text{ – аридна зона,} \\ 0,20 < X/PET < 0,50 & \text{ – напіваридна зона,} \end{aligned} \quad (3)$$

де  $X$  — шар середніх річних опадів.

На сьогоднішній день серед показників посушливості поширені такі як показники посухи Бальме і Мулі (BMDI); показник вологи культури (CMI); показник ступеня тяжкості посухи Палмера (PDSI); відсоток відповідності (PN); показник регенерації після посухи (RDI); показник поверхневих водних ресурсів, (SWSI); стандартизований індекс сумарного випаровування і опадів (SPEI); стандартизований індекс опадів (SPI) тощо [6].

З них найчастіше використовуються індекси PDSI, SPI і SPEI.

Після порівняння цих трьох індексів був зроблений висновок про перевагу Стандартизованого індексу сумарного випаровування і опадів (SPEI), заснованого на даних про опади і температуру повітря. Цей індекс має перевагу поєднання мультискалярного характеру з можливістю включати температурну мінливість при оцінці посухи. Математично, SPEI подібний до стандартизованого індексу опадів (SPI), але він ще враховує температури. Оскільки SPEI заснований на водному балансі, його можна порівняти з індексом тяжкості посухи Палмера (PDSI). В порівнянні з PDSI, SPEI має ту перевагу, що він мультискалярний, і це є вирішальним для аналізу і моніторингу посухи.

За умовам глобального потепління PDSI і SPEI ідентифікують збільшення тяжкості посухи, пов'язаної із збільшенням водної потреби зростання сумарного випаровування з поверхні.

В той же час, стандартизований індекс опадів SPI також має свої переваги, оскільки він простий, просторово стабільний і ймовірнісну природу, так що його можна використовувати при аналізі ризиків і рішень, а також корегувати під періоди часу, які становлять інтерес для користувачів. SPI є засобом, розробленим для проведення моніторингу місцевих посух. Він призначений для визначення тривалості і ступеня інтенсивності посух в різних масштабах часу [9].

Індекс SPEI легкий для обчислення, його розрахунок ґрунтується на обчисленні SP. SPI розраховують, використовуючи в якості вхідних даних щомісячні (або щотижневі) опади. SPEI використовує різницю між

щомісячними (або щотижневими) опадами  $X$  і потенційним випаровуванням  $PET$ . Тобто до цього індексу входять основні приходні і витратні частини водного балансу.

Першим кроком є обчислення середньомісячного  $PET$

$$PET = 16k \left( \frac{10T}{I} \right)^m, \quad (4)$$

де  $T$  – середньомісячна температура повітря, °С;  $I$  – індекс тепла, який розраховується як сума 12-місячних значень індексу  $i$ , який залежить від температури повітря;  $m$  – коефіцієнт, який залежить від  $I$ ;  $k$  – корегуючий коефіцієнт, який залежить від широти і місяця.

Другий крок містить у собі визначення різниці

$$D_i = X_i - PET_i. \quad (5)$$

Цакірісом (Tsakiris et al., 2007) пропонується використовувати відношення  $X/PET$  в якості відповідного параметра для отримання індексу посушливості, який враховує процеси глобального потепління. Цей підхід має деякі недоліки: параметр  $X/PET$  стає невизначеним, коли  $PET = 0$  (який є загальним у багатьох регіонах світу в зимовий період), і  $X/PET$  різко знижує діапазон мінливості і зменшує роль температури під час посух. Розрахункові значення  $D_i$  агрегуються в різних часових масштабах, в тому ж порядку, що і для SPI.

Для розрахунку SPI у різних часових масштабах використовується гамма-розподіл ймовірностей (дво-параметричний гамма-розподіл і три-параметричний розподіл), так як розподіл частоти опадів, накопичених в різних масштабах часу, добре моделюється за допомогою цих статистичних законів розподілу. Якщо SPI можна обчислити за допомогою двох параметрів розподілу, для розрахунку SPEI необхідно три параметри розподілу. У дво-параметричному розподілі змінна  $x$  має за нижню границю нуль ( $0 < x < \infty$ ), в той час як у три-параметричному розподілі  $x$  може приймати значення в діапазоні ( $\gamma < x < \infty$ ), де  $\gamma$  є параметром вихідного розподілу; отже,  $x$  може мати негативні значення, що є характерним для ряду  $D$  [9]. Для стандартизації рядів  $D$  був вибраний лог-логістичний розподіл.

Ймовірність функції щільності три-параметричного лог-логістичного розподілу виражається як

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left( \frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[ 1 + \left( \frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2}, \quad (6)$$

де  $\alpha$ ,  $\beta$  та  $\gamma$  – показники масштабу, форми та параметри щільності розподілу відповідно.

Ймовірність інтегральної функції розподілу ряду  $D$ , відповідно до лог-логістичного розподілу, отримують із рівняння

$$F(x) = \left[ 1 + \left( \frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1}, \quad (7)$$

Значення  $F(x)$  для ряду  $D$  в різних часових масштабах дуже добре адаптуються до емпіричних значень  $F(x)$  в різних обсерваторіях, незалежно від кліматичних характеристик і часового масштабу.

Індекси SPEI розраховуються з використанням інтегральної функції розподілу  $F(x)$  [9]

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1W + C_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3}, \quad (8)$$

де

$$W = \sqrt{-2\ln(P)} \text{ при } P \leq 0,5, \quad (9)$$

де  $P$  - ймовірність перевищення визначених значень  $D$  або забезпеченість  $D$ ;  $P = 1 - F(x)$ .

Якщо  $P > 0,5$ , то  $P$  замінюється як  $(1-P)$  і знак результуючого SPEI змінюється на зворотний. Константи мають такі значення  $C_0 = 2,515517$ ,  $C_1 = 0,802853$ ,  $C_2 = 0,010328$ ,  $d_1 = 1,432788$ ,  $d_2 = 0,189269$  і  $d_3 = 0,001308$  [9].

Середнє значення SPEI дорівнює 0, а стандартне відхилення – 1. SPEI є стандартизованою змінною, і він може бути порівняним з іншими значеннями SPEI у часі і просторі. Якщо SPEI=0, це вказує на значення, яке відповідає 50% кумулятивної ймовірності  $D$ , згідно з лог-логістичним розподілом [9].

Інтенсивність посухи визначається відповідно до значень SPI та SPEI, представлених в табл. 1 [6].

Таблиця 1. Класифікація значень SPI та SPEI

Значення SPI або SPEI	Категорія
2.00 і більше	Н вологий
1.50-1.99	Дуже вологий
1.00-1.49	Помірно вологий
-.99-.99	Близький до нормального
-1.00-(-1.49)	Помірно сухий
-1.50-(-1.99)	Дуже сухий
-2.00 і менше	Н сухий

**Методи досліджень.** У роботі використаний метод водно-теплового балансу, за яким визначалися такі складові як максимально можливе випаровування, кліматичний стік [2, 4]; методи розрахунків індексів посушливості (SPI та SPEI); дані сценарію глобального потепління A1B.

**Матеріали досліджень.** У роботі використані ряди метеорологічних спостережень з 1947 по 2000 рр. на метеорологічній станції Ужгород.

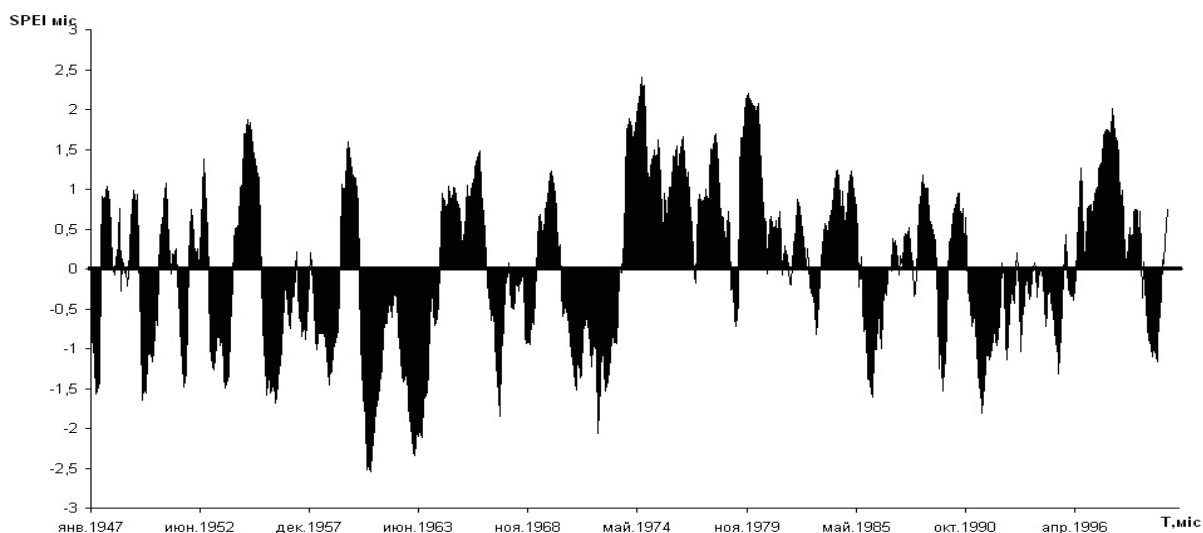
**Аналіз результатів.** Індекс Мартонні, розрахований за (1) дорівнює 37. Він показує, що територія Закарпаття не відноситься до аридних зон, оскільки  $\alpha > 15$ . За формулою ЮНЕСКО [10] ступінь аридності можна визначити за співвідношенням опадів та потенційної евапотраспірації. У зв'язку з деякою невизначеністю цього поняття нами була використана величина максимально можливого випаровування  $E_m$ , яка В.С. Мезенцевим [5] трактується як максимально можливе випаровування з поверхні суші, яке мало би місце, якби на процес випаровування були б витрачені усі теплоенергетичні ресурси клімату.

У роботах Є.Д. Гопченка та Н.С. Лободи [2, 4] виконані для території України просторові узагальнення величини  $E_m$  та отримана регіональна формула для його визначення.

Для середнього багаторічного періоду на метеостанції Ужгород величина  $\beta_n = \frac{\bar{X}}{E_m}$  дорівнює 0,83, що свідчить про те, що Закарпаття не відноситься до аридних зон.

Нами були розраховані та проаналізовані індекси SPEI та SPI для станції Ужгород за допомогою комп'ютерної програми. На вході в програму використовувалися значення температури повітря, сум опадів та широти метеостанції (розрахунок SPEI) або лише значення опадів (розрахунок SPI). На виході були отримані індекси посухи.

На рис. 1 показана зміна середньомісячних індексів SPEI.

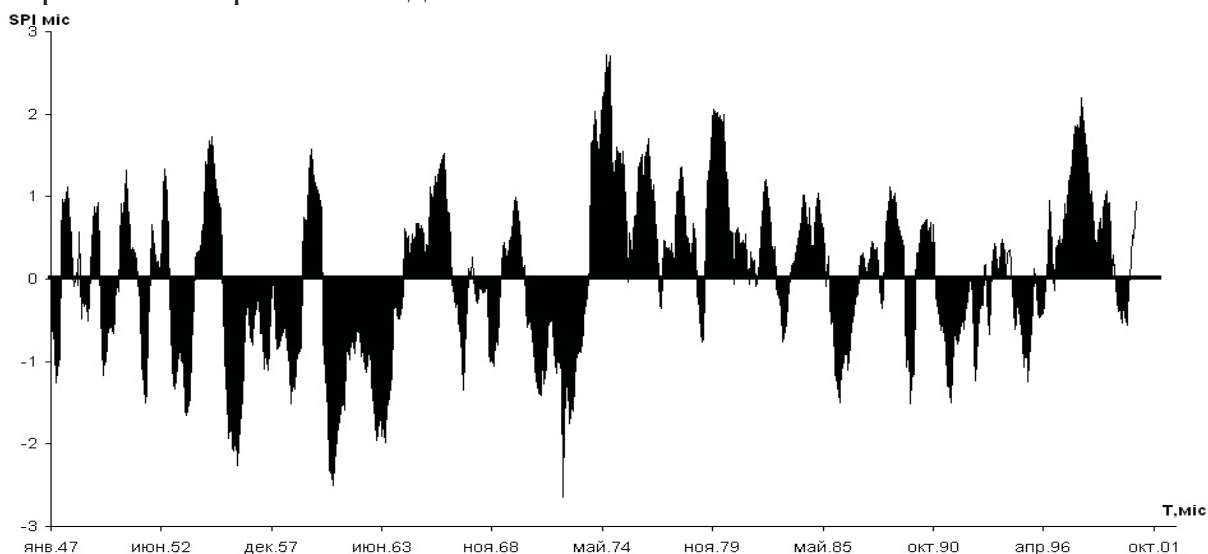


**Рис. 1. Хронологічний хід середньомісячних індексів посушливості SPEI, р.Уж - м. Ужгород, 1947–2000 рр.**

З рис.1 видно, що тривалі сухі періоди на станції Ужгород майже не траплялися. Значення SPEI показують, що в період з 1947 по 2000 рр. було зареєстровано близько 9 випадків посух. Всі вони представляли собою переважно помірно сухі посухи тривалістю не більше 1-2 років. Повторюваність вкрай сухих періодів (індекс менше -2) – 2%, дуже сухих періодів – 5%, помірно сухих періодів – 11%. Ці цифри вказують на те, що

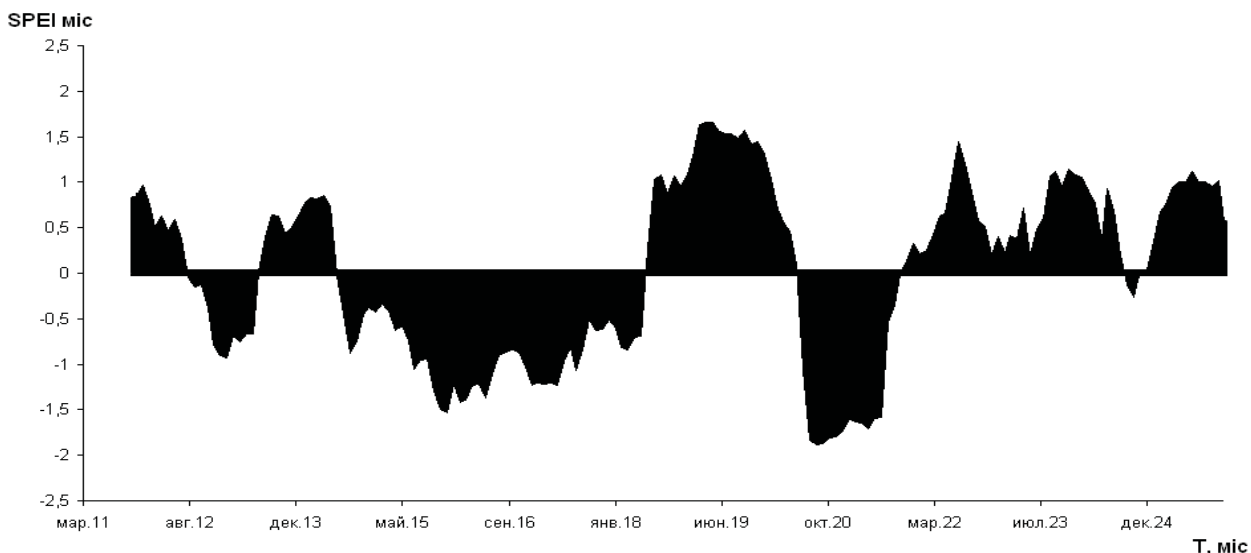
явище посух в Закарпатті не є переважаючою особливістю, оскільки досить часто спостерігаються і вологі періоди.

На рис. 2 показана зміна середньомісячних індексів SPI. Співставлення хронологічного ходу SPEI (рис. 1) та SPI (рис. 2) показує, що для території Закарпаття він практично однаковий.



*Рис. 2. Хронологічний хід середньомісячних індексів посушливості SPI, р.Уж - м.Ужгород, 1947-2000 рр.*

Розрахунок індексів SPEI був виконаний на основі сценарію A1B, з використанням даних про середньомісячні температури повітря та опади (рис. 3). Отримані результати показали, що вкрай сухих періодів не прогнозується, повторюваність дуже сухих періодів становитиме 8%, помірно сухих – 11%. Дуже сухі періоди спостерігатимуться у 2020-2021 рр.



*Рис. 3. Хронологічний хід середньомісячних індексів посушливості SPEI, сценарій A1B, 2011-2025 рр.*

**Висновки.** Виконані розрахунки індексів посушливості SPEI та SPI дозволили зробити висновок, що за сценарієм глобального потепління повторюваність дуже сухих періодів у 2011–2025 рр. збільшиться на 3%, помірно сухих періодів – майже не зміниться. Найбільші значення SPEI

(SPEI<-1,8) прогноуються на серпень-листопад 2020 р., що відповідає дуже сухим періодам.

### Список літератури

1. Будыко М. И. Глобальная экология // М.И. Будыко. – М.: Мысль, 1977. – 328 с.
2. Гопченко Е.Д. Водные ресурсы северо-западного Причерноморья (в естественных и нарушенных хозяйственной деятельностью условиях). // Е.Д.Гопченко, Н.С.Лобода. – К. : КНТ, 2005. – 188 с.
3. Родда Дж. К. Грани гидрологии / Дж. К. Родда. – Л. : Гидрометеиздат, 1987. – Т.2. – 534 с.
4. Лобода Н.С. Расчеты и обобщения характеристик годового стока рек Украины в условиях антропогенного влияния / Н.С. Лобода. – Одеса : Экология, 2005. – 208 с.
5. Мезенцев В.С. Увлажненность Западно-Сибирской равнины // В.С. Мезенцев, И.В. Карнацевич. – Л. : Гидрометеиздат, 1969. – 75 с.
6. Разии Т. Мониторинг засухи с использованием показателя SPI в провинции Ядз, Иран // Т. Разии, Б.Сагафьян, А.Шокухи // Публикации Тренингового центра МКВК. – 2005. – Вып. 12. – С. 27-37.
7. Торнтвейт С.В. Об индексе влажности / С.В.Торнтвейт // Синэкология. – Тегеран : Изд-во Тегеранського университета, 1976. – С. 55–94.
8. Dracup, J.A. On the definition of droughts / Dracup J.A., Lee K.S. & Paulson E.G.Jr. // Water Resour. Res. – 1980. – 16(2). – P.297-302.
9. Vicente-Serrano S.M. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index / Vicente-Serrano S.M., Begueri S.A., Lopez-Moreno J.I. // Journal of climate. – 2009. – P.23.
10. UNESCO, Map of the world distribution of arid regions. MAB Technical Note no 7. – 1979.

### Оцінка характеристик посушливості Закарпаття в сучасних та майбутніх умовах (за сценарієм глобального потепління)

**Лобода Н.С., Хохлов В.М., Божок Ю.В.**

Оцінено характеристики посушливості Закарпаття на основі даних спостережень та на основі сценарію зміни глобального клімату А1В з використанням індексів посушливості SPI та SPEI.

Теоретичним базисом дослідження є метод водно-теплового балансу, методи розрахунку індексів посушливості.

**Ключові слова:** посуха; індекси посушливості; Закарпаття.

### Оценка характеристик засушливости Закарпатья в современных и будущих условиях (по сценарию глобального потепления)

**Лобода Н.С., Хохлов В.Н., Божок Ю.В.**

Оценена характеристики засушливости Закарпатья на основе данных наблюдений и на основе сценария изменения глобального климата А1в с использованием индексов засушливости SPI и SPEI.

Теоретическим базисом исследования является метод водно-теплового баланса, методы расчета индексов засушливости.

**Ключевые слова:** засуха; индексы засушливости; Закарпатье.

### Assessment of droughtyness descriptions of Transcarpathia in modern and future terms (global climate change scenarios).

**Loboda N.S., Khokhlov V.N., Bozhok Y.V.**

The change of droughtyness descriptions of Transcarpathia is appraised on the basis of supervisions and on the basis of global climate change scenarios А1В with the use of indexes of droughtyness SPI and SPEI.

The theoretical base of research are a method of water-heat balance, methods of calculation of droughtyness indexes.

**Keywords:** drought; droughtyness indexes; Transcarpathia.

**Надійшла до редколегії 01.06.11**