**УДК 556:626.81:631.6**

**Попович В. Ф., с.н.с., Дунаєва Є. А., к.т.н., м.н.с.** (Інститут сільського господарства Криму), **Коваленко П. І., д.т.н., радник дирекції інституту** (Інститут водних проблем і меліорації НААН)

# ВИКОРИСТАННЯ СТАНДАРТИЗОВАНОГО ІНДЕКСУ ОПАДІВ (SPI) ДЛЯ ОЦІНКИ РІВНЯ ВОДОЗАБЕЗПЕЧЕНОСТІ ТЕРИТОРІЇ ТА УМОВ РОБОТИ ВОДОГОСПОДАРСЬКИХ ОБ'ЄКТІВ

**Наведено алгоритм та основні принципи оцінки рівня посушливості або зволоженості території на основі отримання нормалізованих значень стандартизованого індексу опадів та приклади його застосування для аналізу відхилення від нормальних умов зволоження території та критичних періодів роботи водосховищ.**
***Ключові слова*: індекс, опади, SPI, водозабезпеченість, посушливість, зволоженість, територія, оцінка, водосховище.**

На сьогоднішній день у світі існує багато різноманітних критеріїв, запропонованих фахівцями різних країн щодо визначення водопотреби сільгоспкультур або територій у водних ресурсах та співставлення її з наявними на території водними ресурсами, у тому числі з урахуванням додаткових ресурсів, які надходять на територію у вигляді річкового стоку, або мережею водогосподарської інфраструктури. Деякі з показників є досить відомими та визнаними у світі для оцінки загального стану водозабезпеченості території (ступеню аридності або вологості), наприклад, за співвідношенням кількості опадів з енергетичним потенціалом щодо їх випаровування – Г.Т. Селянінова [1], В. Палмера (Palmer W.) [2] та ін. [3, 4, 5]. Ці показники, у більшості випадків, можуть використовуватись у будь-яких країнах світу, але вони можуть мати певні недоліки, наприклад, пов'язані з необхідністю застосування параметрів, які не є поширеними для вимірювання на певних територіях чи у деяких країнах.

Стандартизований індекс опадів (Standardized Precipitation Index, SPI) було розроблено Маккі (McKee) та ін. у 1993 р. [6] для визначення кількісних показників дефіциту опадів з використанням місячних даних опадів з часовими інтервалами від 1 до 48 місяців (найбільш поширеними є 1, 3, 6, 12, 24-х місячні інтервали).

Розрахунок SPI базується на багаторічних даних спостережень (звичайно це не менш 30 років). При цьому змінний інтервал розраху-

нків дозволяє одночасно проводити моніторинг різних процесів, таких як доступність водних ресурсів та ґрунтової вологи, зміни припливу до водосховищ та динаміки корисного об'єму, зміни рівнів підґрунтових вод тощо.

У більшості випадків (як базовий варіант) розподіл опадів для розрахунків приймається за гамма розподілом, котрий перетворюється в нормальний розподіл ймовірностей, що є головною ідеєю алгоритму для створення можливості його застосування як нормалізованого параметру, який можна порівнювати як у часовому, так і в територіальному просторі.

Суттєва нестача опадів, або посуха, як явище починає відмічатися, коли значення SPI знижуються до "-1" та нижче. Значення індексу, що дорівнює та вище одиниці ($\geq 1$) характеризує вологі умови, якщо значення нижче "-2" або вище +2 – умови періоду є відповідно екстремально посушливими, або екстремально вологими. За пропозицією розробників кількість опадів за розрахунковий період, що відповідає значенню SPI у діапазоні від "-0.99" до +0.99 є близькою до норми, але за прийнятою в Україні практикою межі цих відхилень суттєво відрізняються від середніх умов водозабезпеченості (наприклад, достатньо багато зрошуваних систем побудовано на 75% забезпеченість опадів, відповідно з SPI близько -0.67), тому в наведеній таблиці цей діапазон має додаткову градацію (див. таблицю). Додаткові проміжні значення індексу SPI для загальноприйнятої градації забезпеченості опадів (дуже вологий період – 5%, вологий – 10%, середньовологий – 25%, середній – 50%, середньосухий – 75% і т. ін.) можуть бути отримані за таблицями інтегралу нормального розподілу ймовірностей.

Враховуючи доступність даних для розрахунку та можливість стандартизації цього індексу, він знаходить все більше поширення у різних регіонах світу в якості інструменту моніторингу поточної ситуації або вивчення та аналізу різних сценаріїв зміни водозабезпеченості, включаючи аналіз впливу змін клімату.

Загальноприйнятою практикою для розрахунків SPI є застосування гамма розподілу ймовірностей для довготривалих рядів даних опадів (хоча можливе використання розподілу Пірсона 3 типу; неповного бета розподілу та ін.) з використанням наступної стандартної функції для щільності ймовірності

Таблиця

Варіювання оцінок водозабезпеченості в залежності від індексу SPI та забезпеченість відповідної величини опадів за розрахунковий період

| Значенні індексу SPI | Період за волого-забезпеченістю | Забезпеченість, % |
|---|---|---|
| > 3.0 | екстремально вологий | < 0.1 |
| 2.0 | екстремально вологий | 2.3 |
| 1.5 | дуже вологий | 6.7 |
| 1.0 | вологий | 15.9 |
| 0.674 | середньовологий | 25.0 |
| 0.5 | близький до середнього | 30.8 |
| 0.0 | середній | 50.0 |
| - 0.5 | близький до середнього | 69.2 |
| - 0.674 | середньосухий | 75.0 |
| - 1.0 | сухий | 84.1 |
| -1.5 | дуже сухий | 93.3 |
| -2.0 | екстремально сухий | 97.7 |
| < - 3.0 | екстремально сухий | > 99.9 |

$$g(x)=\begin{cases} x_i^{\alpha-1}\cdot\dfrac{e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)}, & x_i\geq 0, \\ 0, & x_i<0 \end{cases}, \qquad (1)$$

де $g(x)$ – щільність розподілу ймовірності;

$\alpha$ – параметр форми;

$\beta$ – параметр масштабу;

$x_i$ – кількість опадів, мм;

$\Gamma(\alpha)$ – гамма-функція.

Оцінки параметрів ймовірності щільності розподілу гамма функції можуть бути отримані з використанням методу найбільшої подібності. Позначимо різницю логарифму середнього значення опадів та середньої суми логарифмів значень опадів за окремі періоди як “А”, тобто

$$A=\ln(x_{cp})-\Sigma\ln(x_i)/n, \qquad (2)$$

де $n$ – кількість періодів спостережень, в яких спостерігались опади;

$x_{cp}$ – середнє значення опадів за багаторічний період для розраху-

нкового інтервалу, мм.

У цьому випадку будемо мати ([7]) наступні оцінки параметрів:

$$\hat{\alpha} = (3 + (9 + 2 \cdot A)^{-2}) / 12 \cdot A; \quad \hat{\beta} = \frac{x_{cp}}{\hat{\alpha}}. \tag{3}$$

Отримані параметри використовуються для інтегральної оцінки ймовірності опадів з урахуванням розрахункового місяця та часового періоду розрахунків. Позначаючи $y = x / \tilde{\beta}$, накопичена ймовірність може бути представлена неповною гамма функцією

$$G(x) = \int_0^x g(x)dx = \frac{\hat{\beta}^{-\hat{\alpha}}}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x y^{\hat{\alpha}-1} \cdot e^{-y} dy. \tag{4}$$

Враховуючи те, що гамма функція не визначена для $x_i = 0$, а значення опадів можуть мати нульові дані (тобто опади можуть бути відсутні у деякий період часу), накопичена ймовірність H(X) у цьому випадку розраховується як сума імовірності нульових опадів та її відхилення від одиниці помножене на розраховану за формулою 4 ймовірність.

Перехід від гамма розподілу до нормального здійснюється з використанням наступної апроксимації [8], тобто *H(X)* – трансформується у SPI за наспупними співвідношеннями

для $0 < H(X) \le 0{,}5$

$$SPI = -\left( t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right), \tag{5}$$

для $0{,}5 < H(X) < 1{,}0$

$$SPI = +\left( t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right), \tag{6}$$

де, для $0 < H(X) \le 0{,}5$

$$t = \sqrt{\ln\left( \frac{1}{H(x)^2} \right)}, \tag{7}$$

а для $0{,}5 < H(X) < 1{,}0$

$$t = \sqrt{\ln\left( \frac{1}{(1 - H(x))^2} \right)} \tag{8}$$

та $C_0$, $C_1$, $C_2$, $d_1$, $d_2$, $d_3$ – константи (значення яких дорівнює: $c_0$ = 2,515517, $c_1$ = 0,802853, $c_2$ = 0,010328, $d_1$ = 1,432788, $d_2$ = 0,189269, $d_3$ = 0,001308).

На рисунку 1 наведено результати розрахунків стандартизованого індексу опадів з візуалізацією динаміки отриманого територіального розподілу SPI для північно-західної та центральної частини України за першу половину вегетаційного періоду 2013 р., реалізованої за допомогою відкритої ГІС (QGIS).

Для заданого періоду часу SPI може бути визначено для різних часових проміжків, розраховуючи накопичену ймовірність для обраного місця та необхідного проміжку часу. Для водогосподарських розрахунків та аналізу впливу посушливих періодів рекомендовано використовувати проміжки часу кратні 3 місяцям (3, 6 … 24). 1..3-місячні значення індексу SPI активно використовуються для моніторингу виникнення сільськогосподарської посухи [9, 10], тобто є суттєвою характеристикою наявності водних ресурсів на території, особливо в посушливих умовах південного степу, в т.ч. використання цього показника стає поширеним і в Україні [11, 12].

Для отримання розрахункових параметрів цього індикатору необхідна наявність бази даних опадів та поточні їх значення. Обробка даних проводилась з використанням аналітичних процедур (створених на базі Microsoft VBA та Visual FoxPro).

Граничні критерії для віднесення певної оцінки до рівня вологозабезпеченості (відхилення від норми) здійснюється відповідно градації, наведеної у таблиці (частково розширеною у порівнянні з базовою [6]). Враховуючи те, що цей показник є стандартизованим, його зручно використовувати як для оцінки та порівняння стану поточної водозабезпеченості території (та візуалізації результатів розрахунків), так і для аналізу можливих трендів та сценаріїв на майбутнє, у т.ч. і для оцінки стану та умов перезволожених територій.

Крім визначення періоду сільськогосподарської посухи, тобто періоду, коли водоресурсний потенціал території має від'ємне значення, або моніторингу періодів перезволоження території, цей індекс може використовуватись для характеристики динаміки водних ресурсів у водосховищах та інших цілей.

На рис. 2 наведено 6, 12 та 24-х місячний тренди цього критерію, які дозволяють аналізувати періоди нестачі води для водосховищ, навіть маючих багаторічне регулювання (приклад створено за результатами обробки даних метеорологічної станції Сімферополь з використанням різних часових інтервалів). При цьому чітко розрізняються

Рис. 1. Оцінка забезпеченості опадами північно-західної та центральної частини України за індексом SPI, квітень-червень 2013 р.

довгострокові посушливі періоди, які є проблемними не тільки для сільгоспвиробників, але і для управління водогосподарськими об'єктами, зокрема такими, як Сімферопольське водосховище, яке має можливість багаторічного регулювання.

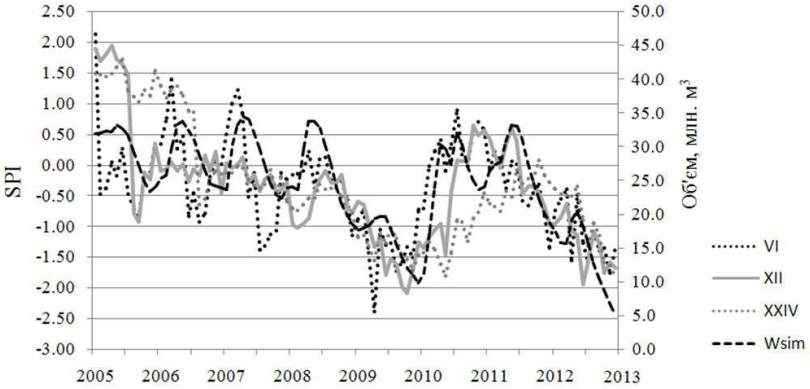


Рис. 2. Оцінка динаміки посушливих періодів за індексом SPI (метеостанція Сімферополь) та середньомісячного об'єму Сімферопольського водосховища (Wsim) за період 2005 – 2013 рр.

Наведені на рисунку дані свідчать про досить тісний зв'язок між періодами наповнення та спрацьовування робочого об'єму Сімферопольського водосховища та динамікою варіювання стандартизованого індексу опадів, розрахованого за піврічний та річний інтервали. Цей взаємозв'язок може бути використаний як для моніторингу та прогнозування можливості виникнення напружених умов експлуатації водогосподарських об'єктів, за умов наявності довгострокових метеорологічних прогнозів, так і для моделювання вирішення сценарних варіантів розв'язання такого класу завдань (не тільки у посушливі періоди, а у екстремально-вологі також) у задачах, зв'язаних зі змінами клімату.

**Висновки.**

1. Нормалізовані значення ретроспективних, поточних або прогнозних відхилень опадів від багаторічної норми можуть бути використані для порівняння або моніторингу поточної ситуації чи можливих змін, як за просторовим розподілом, так і за часовою динамікою, включаючи аналіз роботи водогосподарських об'єктів не тільки в умовах посушливих, але і для перезволожених територій також.

2. Застосування стандартизованого індексу опадів з часовим інтервалом 6 та 12 місяців для аналізу роботи Сімферопольського водосховища свідчить про те, що ця методологія може використовуватись, в

т.ч. для пошуку критичних періодів роботи об'єктів водогосподарської інфраструктури, які мають невелику ймовірність перевищення розрахункових параметрів, таких, наприклад, як водосховища, чисельне моделювання роботи яких з урахуванням низки можливих сценаріїв є досить трудомістким.

**1.** Сельскохозяйственный энциклопедический словарь / гл. ред. В. К. Месяц. – М. : Сов. энциклопедия, 1989. – 656 с. **2.** Palmer W. Meteorological Drought [Електронний ресурс] // Research paper no.45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, 1965. – 58 p. – Режим доступу: http://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/drought/docs /palmer.pdf **3.** Блютген И. География климатов / И. Блютген. – Т. 2. – М. : Прогресс. 1973. – 402 с. **4.** Зубащенко Е. М. Региональная физическая география. Климаты Земли: учебно-методическое пособие. Часть 1 / Е. М. Зубащенко, В. И. Шмыков, А. Я. Немыкин, Н. В. Полякова. – Воронеж : ВГПУ, 2007. – 183 с. **5.** Bos, M. G. Irrigation and drainage performance assessment : practical guidelines / Bos, M. G., Burton, M. A. S, Molden, D. J. // CABI Pub, Wallingford, Oxfordshire, U.K. ; Cambridge, Mass, 2005. – 158 p. **6.** McKee T. B. The relationship of drought frequency and duration to time scales / McKee T. B., Doesken N. J., Kleist J. // In Propeedings of the 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, CA, USA, 17–22 January 1993; – Pp. 179-184. **7.** Thom H.C.S. A note on the gamma distribution // Monthly Weather Review. – 1958, – Vol. 86, № 4. – P. 117-122. **8.** Abramowitz M. Handbook of Mathematical Functions / Abramowitz M., Stegun I. A. // – Dover Publications, INC. : New York, USA, 1965. – 1046 pp. **9.** Karavitis C. A. Application of the Standardized Precipitation Index (SPI) in Greece [Електронний ресурс]/ Karavitis C. A., Alexandris S., Tsesmelis D. E., Athanasopoulos G. // Water 2011, 3. – 787-805 pp. – Режим доступу: www.mdpi.com/2073-4441/3/3/787/pdf **10.** Agricultural Drought Indices [Електронний ресурс]/ Sivakumar, Mannava V. K., Motha R. P., Wilhite D. A., Wood D. A.(Eds.) // Proceedings of the WMO/UNISDR Expert Group Meeting on Agricultural Drought Indices, 2-4 June 2010, Murcia, Spain. – Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization. AGM-11, WMO/TD No. 1572; WAOB, 2011. – 197 pp. – Режим доступу: www.wamis.org/agm/pubs/agm11/agm11.pdf **11.** Семёнова И. Г. Метеорологические и синоптические условия засухи в Украине осенью 2011 г. // Український гідрометеорологічний журнал. – 2012. – № 10. – С. 58-64. **12.** Коробчінська А. О. Водные ресурсы Закарпатья в условиях глобального изменения климата [Електронний ресурс] / Матеріали XI наукової конференції молодих вчених ОДЕКУ. – Одеса : ОДЕКУ, 2011. – С. 63–64. – Режим доступу: http://www.odeku.edu.ua/FILES/42F1C7AC6EFAE10AF9E49 02EF66076C2.pdf

Рецензент: к.т.н., доцент Герасімов Є. Г. (НУВГП)

**Popovych V. F., Senior Research Fellow, Dunaieva I. A., Candidate of Engineering, Junior Research Fellow** (Institute of Agriculture of Crimea), **Kovalenko P. I., Doctor of Engineering, Professor** (Institute of Water Problems and Land Reclamation of the NAAS)

**STANDARDIZED PRECIPITATION INDEX USAGE FOR ESTIMATION OF WATER AVAILABILITY OF THE TERRITORY AND THE WATER FACILITIES OPERATING CONDITIONS**

**Provided algorithm and basic principles of the level of aridity or humidity of the territory estimation on the base of applying of normalized values of Standardized Precipitation Index and examples of its usage for analysis of abnormality of wetting of the territory and critical periods of reservoirs operating.**
***Keywords*: index, precipitation, SPI, water availability, aridity, humidity, territory, evaluation, reservoir.**

---

**Попович В. Ф., с.н.с., Дунаева Е. А., к.т.н., м.н.с.** (Институт сельского хозяйства Крыма), **Коваленко П. И., д.т.н., советник дирекции института** (Институт водных проблем и мелиорации НААН)

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТАНДАРТИЗИРОВАННОГО ИНДЕКСА ОСАДКОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ВОДООБЕСПЕЧЕННОСТИ ТЕРРИТОРИИ И УСЛОВИЙ РАБОТЫ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

**Рассмотрен алгоритм и основные принципы оценки уровня засушливости или увлажненности территории на основе получения нормализованных значений стандартизированного индекса осадков и примеры его использования для анализа отклонения от нормальных условий увлажнения территории и критических периодов работы водохранилищ.**
***Ключевые слова*: индекс, осадки, SPI, водообеспеченность, засушливость, увлажненность, территория, оценка, водохранилище.**

---