

ВИКОРИСТАННЯ КОМПЛЕКСНИХ ПОКАЗНИКІВ ПОСУШЛИВОСТІ З МЕТОЮ АГРОМОНІТОРИНГУ

Н. Сердюченко, канд. геогр. наук,
УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого,
А. Сердюченко, учениця 10 кл.,
Дослідницька ЗОШ І-ІІІ ст.

Наведено аналіз найпоширеніших індексів посушливості, отриманих за допомогою наземних метеостережень і дистанційного зондування землі, та шляхів їх практичного застосування. Представлено джерела отримання баз даних та інтерпретацію значень індексу суворості посухи Палмера, стандартизованого індексу опадів, комбінованого індикатора посухи та індексу стресу сільськогосподарських культур. Проаналізовано слабкі та сильні сторони кожного із показників.

Ключові слова: *посуха, індекс посушливості, стандартизований індекс опадів, комбінований індикатор посухи, індекс стресу сільськогосподарських культур.*

Суть проблеми. Відповідно до останніх досліджень IPCC (International Panel of Climate Change¹) в результаті кліматичних змін, які ми зараз спостерігаємо і відчуваємо, значно зростає ймовірність і кількість метеорологічних екстремумів, включаючи посухи. Небезпека посухи для сільського господарства є найбільшою оскільки її наслідки можуть призводити до значного пошкодження сільськогосподарських культур та втрат врожаю. Тому в задачах агромоніторингу, корисним є застосування кількісних показників інтенсивності посухи – індексів посушливості. Ці показники також можуть використовуватися для конкретних потреб, таких як планування зрошення, боротьба з посухою та можуть слугувати предиктором для експертного аналізу прогнозних оцінок очікуваної врожайності сільськогосподарських культур, тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить що індекси посушливості широко використовуються в різних галузях природокористування [1-9] і можуть бути визначені кількісно з використанням різних співвідношень середньорічних агрометеорологічних величин і середньобаторічних даних.

Метою цього дослідження є аналіз найпоширеніших індексів посушливості, отриманих за допомогою наземних метеостережень та

¹ www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/

дистанційного зондування землі, та представлення шляхів їх практичного застосування.

Основна частина. *Індекс суворості посухи Палмера* (Palmer Drought Severity Index, PDSI; Palmer, 1965[10]) пов'язує жорстокість посухи із накопиченими зваженими різницями між фактичними опадами і відповідними потребами в евапотранспірації. PDSI базується на концепції гідравлічної системи акумулювання і фактично використовується для оцінки тривалості періодів аномально вологої або сухої погоди.

Розрахунок цього показника базується на використанні доступних метеорологічних даних (температури повітря й опадів), а також локальних констант, які характеризують вологоємність ґрунту. На основі цих вхідних величин за допомогою спрощеної схеми вологоперенесення в ґрунті проводиться розрахунок фактичних та потенційних значень евапотранспірації, а також інші складові водного балансу, і розраховується PDSI [7].

Інтерпретуючи значення цього індексу виділяють 11 градацій зволоженості (табл. 1): значення в діапазоні від -0,49 до 0,49 відповідають нормальним умовам; значення менші -4 – екстремально посушливим; значення більші 4 – екстремально вологим умовам; проміжні градації характеризують такі ступені посушливості і надлишкової зволоженості, як початкова, слабка, помірна і сильна.

Таблиця 1 – Інтерпретація значень PDSI. Джерело:²

Категорія зволоження	Значення PDSI	Категорія зволоження	Значення PDSI
Екстремально волого	$\geq 4,0$	Початкова фаза сухості	-0,50 – -0,99
Дуже волого	3,00 – 3,99	Слабко сухо	-1,00 – -1,99
Помірно волого	2,00 – 2,99	Помірно сухо	-2,00 – -2,99
Слабко волого	1,00 – 1,99	Дуже сухо	-3,00 – -3,99
Початкова фаза вологості	0,50 – 0,99	Екстремально посушливо	$\leq -4,00$
Близько норми	0,49 – -0,49		

Слід відзначити один аспект, який стосується обчислень, PDSI включає три вхідні параметри – випаровування, надходження вологи в ґрунт і стік – кожен з яких може мати негативні значення. Якщо достатньо дощу, щоб задовольнити лише очікуваний рівень евапотранспірації, але не достатньо, щоб забезпечити підживлення рослин і стік, то в результаті ми отримаємо негативний індекс. Тобто за такої ситуації сільськогосподарські культури ще деякий час розвиватимуться в нормальному темпі, але вже погіршення стану

² <http://drought.unl.edu/Planning/Monitoring/ComparisonofDroughtIndices.aspx>

зволоження буде прослідковуватися у значенні індексу. Як тільки рівень зволоженості впаде нижче мінімуму, необхідного для посівів, то сільськогосподарські культури будуть реагувати швидким і різким погіршенням стану через відсутність запасів води в ґрунті.

Оперативні значення індексу PDSI для території Європи можна знайти у *Drought Metadata Catalogue*³ Європейського центру моніторингу посух.

Стандартизований індекс опадів SPI (Standardized Precipitation Index), який базується виключно на даних про атмосферні опади, набув широкого застосування наприкінці XX століття.

Розрахунок SPI для будь-якої місцевості базується на довгострокових даних про опади впродовж заданого для аналізу періоду. Довгостроковий ряд апроксимується розподілом імовірностей, який потім перетворюється у нормальний розподіл, з метою приведення до нуля середнього значення SPI для заданого місця і періоду. Позитивні значення SPI вказують на об'єм опадів вище середнього рівня, а негативні – нижче (табл. 2). Оскільки SPI нормалізується, то і вологіші і сухіші клімати можуть бути представлені однаково; відповідно, за допомогою цього індексу можна також здійснюватися моніторинг дощових періодів.

Таблиця 2 – **Інтерпретація значень SPI. Джерело: [11]**

2,0 +	екстремально волого
1,5 – 1,99	дуже волого
1,0 – 1,49	помірно волого
-0,99 – 0,99	близько до норми
-1,0 – -1,49	помірно сухо
-1,5 – -1,99	дуже сухо
-2 і менше	екстремально сухо

Індекс SPI може застосовуватися для моніторингу умов посушливості на будь-яких тимчасових інтервалах (від місяця до року і більше). Варіація масштабів осереднення дає можливість відстежувати за допомогою цього індексу сільськогосподарські наслідки посух, пов'язані з об'єктами, які мають різну чутливість до дефіциту опадів. Також SPI можна співставляти для регіонів з помітно різними кліматичними умовами.

Універсальність SPI дозволяє контролювати як короткострокові водні джерела, такі як вологість ґрунту, що важлива для сільськогосподарського виробництва, так і довгострокові водні ресурси, такі як джерела підземних вод, витрати стоку, а також рівні озер і водосховищ. Імовірнісний характер цього індексу забезпечує історичний контекст, що підходить для процесу прийняття рішень.

³ <http://vap-xjedo.jrc.it/Search/Search.html>

Бази даних SPI, розрахованих для 3-місячних часових проміжків для різних країн світу, починаючи з 1975 року (Україна в тому числі), доступні за посиланням⁴.

Слабкою стороною індексу є відсутність компоненти водного балансу ґрунту і відповідно неможливість розрахунку співвідношення фактичної та потенційної евапотранспірації. Також, оскільки температура повітря не є вихідним параметром для обчислення SPI, цей індекс непридатний для аналізу змін клімату.

Вирішенням такої ситуації стала видозміна індексу (Vicente-Serrano S.M. and all, 2010), включивши компоненту температури у розрахунок нового індексу, який отримав назву стандартизований індекс опадів та евапотранспірації SPEI (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index).

Оперативні значення індексу SPEI для території Європи можна знайти за посиланням⁵. SPEI базується на оцінці випаровуваності методом Пенмана-Монтейта (Penman-Monteith, FAO-56⁶). Метод Пенмана-Монтейта вважається надійним, тому SPEI рекомендується для більшості сфер застосування, включаючи довгостроковий кліматологічний аналіз.

Розрахунок *Комбінованого індикатора посухи CDI* (Combined Drought Indicator) базується на даних SPI, вологості ґрунту (pF) та поглинутої фракції фотосинтетичноактивної радіації (fAPAR) [5].

Індекс SPI визначено світовою метеорологічною організацією як ключовий індикатор посухи, що може бути оперативно розрахований на основі метеоданих.

Вологість ґрунту є однією із найважливіших змінних у гідрологічних, кліматологічних, біологічних та екологічних процесах, оскільки вона відіграє ключову роль у взаємодії атмосфери та земної поверхні.

Поглинута фракція фотосинтетичноактивної радіації fAPAR відображає частину сонячної енергії, яка поглинається в процесі вегетації. Ця складова пропонується як індикатор посухи завдяки своїй чутливості до стресу рослинності (Gobron et al. 2005 [12]), оскільки посуха може призвести до зниження темпів росту рослинності, що залежить від зміни або в поглинанні рослинним організмом сонячної радіації, або в низькій ефективності її використання.

Позитивним фактором використання CDI є комплексність поєднання метеорологічних та вегетаційних індикаторів посухи, що підвищує точність прогнозних оцінок і дозволяє точніше планувати управлінські рішення щодо запобігання негативних наслідків посушливих явищ. Проблемним фактором може бути залежність fAPAR від хмарного покриву і неможливість в окремих випадках (за умови щільних хмар) точного врахування цього

⁴ <http://edo.jrc.ec.europa.eu/edov2/php/index.php>

⁵ <http://sac.csic.es/spei/map/maps.html>

⁶ <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e06.htm>

індикатора, тому в подальших наукових дослідженнях планується залучення більше ніж одного вегетаційних індикаторів для розробки комплексних показників сухості.

Індикатор CDI базується на 5 рівнях інтерактивної оцінки (рис. 1):

- Watch – *період активного спостереження*, коли спостерігається дефіцит опадів;
- Warning – *попередження*, коли цей дефіцит опадів призводить до аномалії вологості ґрунту;

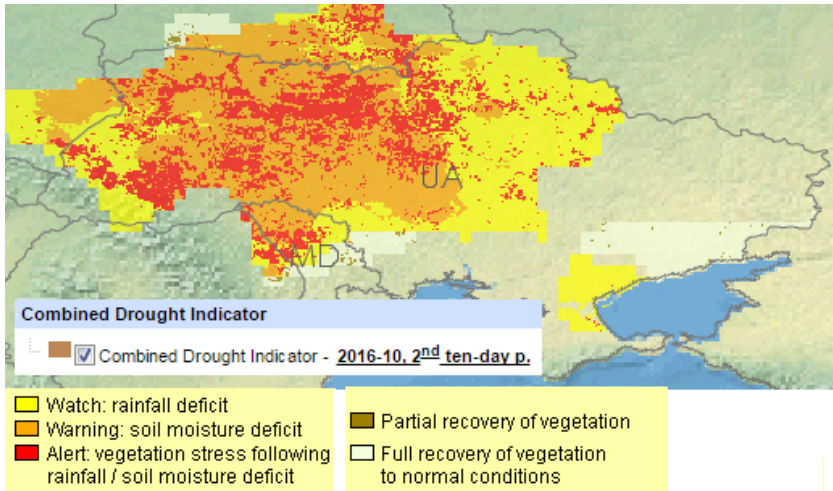


Рисунок 1 – Фрагмент карти CDI для території України (друга декада жовтня 2016 року). Джерело:⁷

- Alert – *стан небезпеки*, коли попередні дві умови супроводжуються негативною аномалією стану вегетації;
- Partial recovery – *часткове відновлення*, коли метеорологічні умови вже відновлені у нормальне русло, а умови рослинності – ще ні;
- Full recovery – *повне відновлення*, коли і метеорологічні, і вегетаційні умови повністю відновлюються до нормального стану після епізоду посухи.

SPI використовується для виявлення дефіциту опадів, аномалії вологості ґрунту використовуються для характеристики наслідків дефіциту опадів на вологість ґрунту, аномалії fAPAR зі свого боку використовуються для характеристики результативного ефекту на стан рослинного покриву. Для

⁷ <http://edo.jrc.ec.europa.eu/edov2/php/index.php?id=1111>

такого дослідження використовуються SPI 3-х місяців (SPI-3) і 1-го місяця (SPI-1).

Доцільність використання SPI-3 підтверджена дослідженнями (наприклад, Ji and Peter, 2003 [13]; Rossi et al., 2012 [14]), які показали, що SPI-3 має найсильнішу кореляцію з відгуком рослинності і тому найбільше підходить для ідентифікації сільськогосподарської посухи. SPI-1 також включено в конструкцію індикатора, оскільки навіть один місяць надмірної сухості може значно вплинути на стан рослинності залежно від стадії розвитку.

Порогом для індивідуальних індексів встановлено 1 стандартне відхилення (-1 для SPI-3 і fAPAR, +1 для вологості ґрунту pF). У випадку SPI-1, обраний поріг становить -2, що стосується лише випадків, ідентифікованих як сильна посуха. У таблиці 3 наведено опис комбінованого індикатора. Приставка Δ вказує на аномалії; суфікс $m-1$ має на увазі значення місяцем раніше.

Таблиця 3 – Інтерпретація значень CDI. Джерело: ⁸

Класифікація	Характеристики
Watch – активне спостереження	SPI-3 < -1 або SPI-1 < -2
Warning – попередження	$\Delta pF > 1$ та (SPI-3 < -1 або SPI-1 < -2)
Alert – стан небезпеки	$\Delta fAPAR < -1$ та (SPI-3 < -1 або SPI-1 < -2)
Partial recovery – часткове відновлення	($\Delta fAPAR < -1$ та (SPI-3 _{m-1} < -1 та SPI-3 > -1)) або ($\Delta fAPAR < -1$ та (SPI-1 _{m-1} < -2 та SPI-1 > -2))
Full recovery – повне відновлення	(SPI-3 _{m-1} < -1 та SPI-3 > -1) або (SPI-1 _{m-1} < -2 та SPI-1 > -2)

Індекс стресу сільськогосподарських культур ASI (Agricultural Stress Index) базується на інтеграції вегетаційного індексу здоров'я (VHI) у двох вимірах – часовому і просторовому, які мають вирішальне значення для оцінки дії посухи в сільському господарстві. На початковому етапі розрахунку ASI проводиться часове усереднення VHI, оцінка інтенсивності і тривалості сухих періодів, які виникають впродовж вегетаційного періоду на рівні пікселів. Другий етап включає визначення просторового ступеня посухи шляхом розрахунку відсотка пікселів в орних областях із значеннями VHI нижче 35 % (це значення було визначено як критичний поріг в оцінці ступеня посухи в попередніх дослідженнях Коган, 1995 [15]). Для полегшення

⁸http://edo.jrc.ec.europa.eu/documents/factsheets/factsheet_combinedDroughtIndicator.pdf

швидкої інтерпретації результатів аналітиками, кожна адміністративна область класифікується відповідно до своєї частки ураженої області (рис. 2).

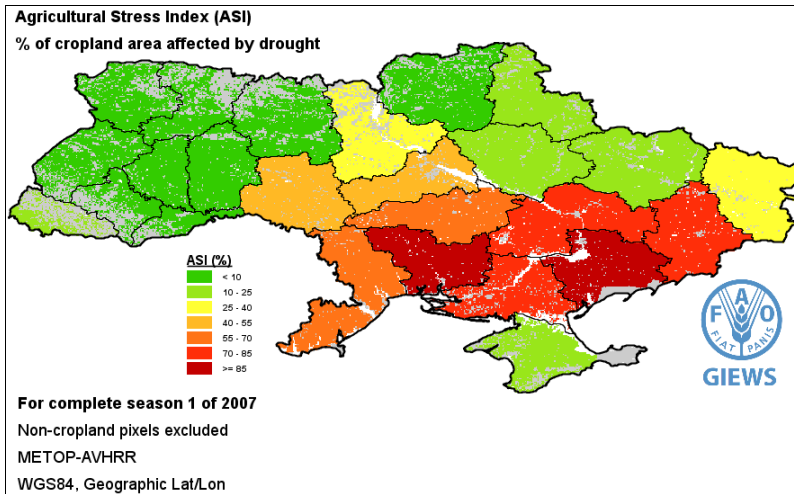


Рисунок 2 – Картограма усереднених впродовж вегетаційного сезону (березень-жовтень) значень ASI для України у посушливому 2007 році.

Значення ASI в різних часових інтервалах аналізу доступні на веб-ресурсі FAO⁹.

Висновки. Застосування показників посушливості з метою агромоніторингу має широкі можливості для практичного впровадження менеджерських заходів боротьби з посухою, планування зрошення та агротехнічних заходів. До того ж експертне врахування показників сухості під час розроблення прогнозу врожайності сільськогосподарських культур дозволить точніше оцінити можливі ризики втрат врожаю.

Переважає більшість індексів сухості та стресовості агрометеорологічних умов для сільськогосподарських культур є у вільному доступі в Інтернет мережі, що значно спрощує їх отримання для оперативного аналізу.

Література:

1. GEOSS 10-Year Implementation Plan: Reference Document // ESA Publication Division. – 2005. – 209 p. ISSN 0379-6566, ISBN 92-9092-986-3.

2. McKee, T.B., N. J. Doesken, and J. Kleist. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th

⁹<http://www.fao.org/gIEWS/earthobservation/country/index.jsp?lang=en&code=UKR#>

Conference of Applied Climatology, 17-22 January 1993, Anaheim, CA. American Meteorological Society. pp.179-184.

3. Mohamed, A.A.; Sharifi, M.A.; Keulen, H. van. An integrated agro-economic and agro-ecological methodology for land use planning and policy analysis // *Journal of Applied Earth Observation and Geo information*. 2. - 2000. - 87-103 p.

4. Palmer, W.C. Meteorological drought. Washington: U.S. Department of Commerce, 1965. 58p. (U.S. Department of Commerce. Research paper, 45).

5. Product Fact Sheet: Combined Drought Indicator – Europe Version 2 (April. 2013) // Available at:

http://edo.jrc.ec.europa.eu/documents/factsheets/factsheet_combinedDroughtIndicator.pdf .

6. Standardized Precipitation Index User Guide http://www.wamis.org/agm/pubs/SPI/WMO_1090_EN.pdf .

7. Thomas R. Karl The Sensivity of the Palmer Drought Severity Index and Palmer’s Z-Index to their Calibration Coefficients Including Potential Evapotranspiration / *Journal of Applied Meteorology* 25(1):77-86 December 1985.

8. Vicente-Serrano S.M., Santiago Begueria, Juan I. López-Moreno, 2010. A Multiscalar Drought Index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, *J. Climate*, vol. 23, pp. 1696–1718, doi: 10.1175/2009JCLI2909.1.

9. Whelan, B.M., McBratney, A.B. The “Null Hypothesis” of Precision Agriculture Management // *Precision Agriculture*, Volume 2, Number 3. - 2000. - 265-279 p.

10. Palmer, W.C. Meteorological drought. Washington: U.S. Department of Commerce, 1965. 58p. (U.S. Department of Commerce. Research paper, 45)

11. Standardized Precipitation Index User Guide. World Meteorological Organization, 2012 // Available at:

http://www.wamis.org/agm/pubs/SPI/WMO_1090_EN.pdf .

12. Gobron, N., Pinty, B., Melin, F., Taberner, M., Verstraete, M. M., Belward, A., Lavergne, T., and Widlowski J.-L.: The state of vegetation in Europe following the 2003 drought, *Int. J. Remote Sens.*, 26, 2013–2020, 2005.

13. Ji, L. and Peters, A.: Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices, *Remote Sens. Environ.*, 87, 85–98, 2003.

14. Rossi, S. and Niemeier, S.: Drought Monitoring with estimates of the Fraction of Absorbed Photosynthetically-active Radiation (fAPAR) derived from MERIS, in: *Remote Sensing for Drought: Innovative Monitoring Approaches*,

edited by: Wardlow, B., Anderson, M., and Verdin, J., CRC Press-Taylor & Francis, Boca Raton, FL, USA, 95–116, 2012.

15. Kogan, F. N.: Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 76, 655–668, 1995.

***Аннотация.** Приведен анализ наиболее распространенных индексов засушливости, полученных с помощью наземных метеонаблюдений и дистанционного зондирования земли, и путей их практического применения. Представлены источники получения баз данных и интерпретация значений индекса суровости засухи Палмера, стандартизированного индекса осадков, комбинированного индикатора засухи и индекса стресса сельскохозяйственных культур. Проанализированы сильные и слабые стороны каждого из показателей.*

***Summary.** The analysis of the most common indices of dryness, obtained with the help of ground meteorological and remote sensing data, and ways of their practical application is given. The sources of obtaining databases and interpretation of Palmer Drought Severity Index, Standardized Precipitation Index, Combined Drought Indicator and Agricultural Stress Index are presented. Analyze of strengths and weaknesses of each of the indicators are given.*