

## Adaptacja wskaźnika SPI na potrzeby monitorowania suszy w wodach podziemnych

Agnieszka Kowalczyk<sup>1</sup>

**Adaptation of the Standardized Precipitation Index SPI for drought monitoring in groundwater.** *Prz. Geol.*, 65: 1301–1305.

*Abstract.* The Standardized Precipitation Index (SPI) proposed by Thomas McKee, Nolan Doesken i John Kleist in 1993 is currently one of the most common meteorological index applied in the assessment of drought intensity. It serves for the quantitative assessment of precipitation deficit within an agreed time scale. The advantage of the SPI is that it can be applied at different time scales and different climatic conditions. It provides an early warning information regarding droughts and is helpful in the assessment of its severity. The authors propose that the method can be applied in, apart from precipitation, assessments of river flows, depth of snow cover, water resources in reservoirs, soil wetness and groundwater levels. The article proposes an index formula that allows for the assessment of drought in groundwater. Gamma distribution, which is most commonly used in the SPI formula and does not describe the distribution of groundwater level properly, was replaced with the empirical distribution. In this way a new tool with the advantages inherited from its progenitor was defined to assess the intensity of drought in groundwater. The new index has all needed attributes to be used to interpret the current hydrogeological situation on both regional and local scales. It can compete with indicators currently used for this purpose in Poland and abroad. The “new standardized groundwater level index” was applied to analyse the course of a groundwater drought that occurred in Poland in recent years (2015–2016).

**Keywords:** groundwater levels, drought, Standardized Precipitation Index (SPI), Standardized Groundwater Level Index

Efektywny wczesny system ostrzegania przed suszą i zarządzanie gospodarką wodną wymaga właściwej interpretacji obszarowej danych monitoringowych w skali co najmniej regionalnej. W przypadku analizy danych punktowych o położeniu zwierciadła wód podziemnych z lokalizacji o różnych warunkach klimatycznych lub hydrogeologicznych pojawia się problem ich porównywalności. Ogólnie wiadomo, że jednym z najlepszych rozwiązań tej kwestii jest standaryzacja danych (Tokarczyk, Szalińska, 2014). Badania i doświadczenia wynikające ze stosowania wskaźników dotyczących innych komponentów cyklu hydrologicznego wskazują, że bardzo dobrze sprawdza się pod tym względem standaryzowany wskaźnik opadu (SPI) (McKee i in., 1993, 1995). Jest to bez wątpienia jedna z przyczyn, dla której stał się on obecnie tak popularny w ocenie intensywności suszy meteorologicznej. Dodatkowymi zaletami tego wskaźnika są: możliwość wyznaczania go dla różnych kroków czasowych oraz względnie niewielkie wymagania co do danych (jeden rodzaj danych – dane opadowe), co przekłada się na łatwość jego stosowania. W rezultacie jest to praktyczne narzędzie służące do klasyfikacji bieżących warunków z podziałem na mokre, normalne lub suche, dające możliwość porównywania różnych lokalizacji niezależnie od zróżnicowania warunków klimatycznych (Komuscu, 1999).

Standaryzowany wskaźnik opadów SPI oblicza się na bazie wieloletnich danych miesięcznych sum opadów. Preferowana długość ciągów pomiarowych wynosi co najmniej 30 lat. Wybiera się wielkość kroku czasowego, po którym grupuje się wyniki pomiarów, np.: 3 miesiące, 6 oraz 12 miesięcy.

Można przyjąć także dłuższe okresy, np. 24 miesiące, przy czym długość ciągów pomiarowych powinna być wówczas odpowiednio dłuższa (powyżej 50 lat). Opis obliczania wskaźnika SPI zawarty jest w pracy McKee i in. (1993).

Ponieważ autorzy wskaźnika SPI sugerują, że poza opadem można w podobny sposób monitorować również inne

elementy cyklu hydrologicznego, jak: przepływy w rzekach i zasoby wodne w zbiornikach wodnych, wilgotność gleby oraz wody podziemne (McKee i in., 1993), w prezentowanej pracy podjęto próbę adaptacji tego wskaźnika do potrzeb monitorowania suszy w wodach podziemnych.

### METODA I MATERIAŁ BADAWCZY

Badania, dzięki którym powstała prezentowana w tej pracy formuła standaryzowanego wskaźnika położenia zwierciadła wód podziemnych, były prowadzone w ramach działalności Państwowej Służby Hydrogeologicznej we współpracy z firmą StatSoft Polska sp. z o.o. (Raport..., 2016). W pracach dążono do otrzymania wskaźnika położenia zwierciadła wód podziemnych o podobnych własnościach do standaryzowanego wskaźnika opadów SPI.

Danymi niezbędnymi do obliczenia proponowanego wskaźnika są wieloletnie obserwacje położenia głębokości zwierciadła wody podziemnej, przedstawione za pomocą szeregu ( $X_n$ ) np. pomiary cotygodniowe. Analogicznie jak w przypadku wskaźnika SPI wybiera się pożądany krok czasowy do obliczeń (np. 3-, 6- lub 12-miesięczny). Następnie, nie sumuje się jak w przypadku opadów, ale wylicza się średni poziom zwierciadła wody w każdym przedziale czasowym o wybranym wcześniej kroku. W wyniku tego otrzymuje się szereg ( $Y_n$ ), w którym  $n$  określa numery okresów (o długości danego kroku czasowego). Metoda uśrednienia, oprócz rozwiązania problemu możliwych braków danych, niweluje też w pewnym stopniu zaokrąglenia wartości z pomiarów tygodniowych.

Jeżeli do szeregu ( $Y_n$ ) dopasowany zostanie rozkład, niekoniecznie gamma, o dystrybuancie  $D$ , to dla opadów wskaźnik  $w(Y_n)$  byłby dany wzorem:

$$w(Y_n) = \Phi^{-1}(D(Y_n)) \quad [1]$$

<sup>1</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; agnieszka.kowalczyk@pgi.gov.pl.

Większa wartość wyrazu szeregu, będąca zapisem głębokości w przypadku zwierciadła wód podziemnych, oznacza okres bardziej suchy. Aby zachować zależność: im większa wartość wskaźnika tym bardziej mokry okres, proponuje się zamienić  $D(Y_n) = \text{pr}(Y \leq Y_n)$  wewnątrz powyższego wzoru na  $\text{pr}(-Y \leq -Y_n) = \text{pr}(Y \geq Y_n) = 1 - D(Y_n)$ . Ponieważ rozkład  $N(0, 1)$  jest symetryczny, to  $\Phi^{-1}(1 - u) = -\Phi^{-1}(u)$  i wskaźnik dla wód podziemnych określony będzie wówczas równaniem:

$$w(Y_n) = -\Phi^{-1}(D(Y_n)) \quad [2]$$

Jedyną pozostającą kwestią do rozwiązania w opracowaniu końcowej formuły wskaźnika jest dopasowanie rozkładu do wartości szeregu ( $Y_n$ ). Rozkład gamma, który uznaje się za dobrze odwzorowujący empiryczne rozkłady częstości miesięcznych sum opadów (Kaczmarek, 1970), a przez to jest powszechnie stosowany w formule SPI (Gąsiorok i in., 2012), nie opisuje właściwie głębokości zwierciadła wód podziemnych. Stąd nie może być zastosowany w przypadku standaryzowanego wskaźnika położenia zwierciadła wód podziemnych. Pozostałe klasyczne rozkłady, w tym normalny, też w ogólnym przypadku nie pasują do rozkładu głębokości zwierciadła wód podziemnych. W związku z tym posłużono się rozkładem empirycznym. Jeśli po uporządkowaniu w kolejności rosnącej wartość szeregu  $Y_n$  przejdzie na  $Y_{(\sigma n)}$  dla określonej permutacji  $\sigma$ , to uznano, że:

$$D(Y_n) = (\sigma(n) - 0,5)/N \quad [3]$$

dla  $n = 1, 2, \dots, N$ , gdzie  $N$  jest liczbą ważnych obserwacji. Odejmując wartość 0,5 wprowadzamy poprawkę na ciągłość. Ocena intensywności suszy w zależności od wartości wskaźnika jest umowna. Charakter systematyczny ma jedynie podanie prawdopodobieństwa tego, że wskaźnik nie przekroczy wartości  $x$ , jest ono bowiem równe  $\Phi(x)$ :  $\text{pr}(w \leq -3) = 0,14\%$ ;  $\text{pr}(w \leq -2,5) = 0,6\%$ ;  $\text{pr}(w \leq -2) = 2,3\%$ ;  $\text{pr}(w \leq -1,5) = 6,7\%$ ;  $\text{pr}(w \leq -1) = 16\%$ ;  $\text{pr}(w \leq -0,5) = 31\%$ ;  $\text{pr}(w \leq 0) = 50\%$ ;  $\text{pr}(w \leq 0,5) = 69\%$ ;  $\text{pr}(w \leq 1) = 84\%$ ;  $\text{pr}(w \leq 1,5) = 93,3\%$ ;  $\text{pr}(w \leq 2) = 97,7\%$ ;  $\text{pr}(w \leq 2,5) = 99,4\%$ ;  $\text{pr}(w \leq 3) = 99,86\%$ .

Na wykresach (ryc. 1) pokazano przykład wyników obliczeń standaryzowanego wskaźnika wód podziemnych dla kroku czasowego: 3, 6 i 12 miesięcy według formuły zaprezentowanej powyżej [1]. Punkt obserwacyjny, dla którego przedstawiono wykresy, znajduje się w Brwinowie w województwie mazowieckim. Reprezentuje płytko zalegającą warstwę wodonośną (strop na głębokości ok. 1 m) o swobodnym zwierciadle wody zbudowaną z piasków czwartorzędowych o miąższości ok. 80 m. Na rycinach okresy odpowiadające wartościom mniejszym od zera wskazują na suszę. W klasyfikacji intensywności suszy w wodach podziemnych proponuje się przyjąć te same arbitralnie ustalone wartości graniczne jakie zastosowano dla opadów w pracy McKee i in. (1993) (tab. 1).

Na wykresach widać różnicę w czasach trwania zdefiniowanych niedoborów wody i intensywności suszy w zależności od przyjętego kroku czasowego (ryc. 1). Ze względu na opóźnienie w reakcji zwierciadła wód podziemnych na zasilanie, szczególnie dla głębszych warstw wodonośnych o większej izolacji, należy zastanowić się nad zasadnością przyjmowania najkrótszego z prezentowanych kroków czasowych, równego 3 miesiącom.

W przypadku wskaźnika SPI skala czasowa odzwierciedla wpływ suszy na dostępność różnych zasobów wod-

**Tab. 1.** Proponowana klasyfikacja intensywności suszy w wodach podziemnych w zależności od wartości standaryzowanego wskaźnika wód podziemnych

**Tab. 1.** Proposed classification of drought intensity using the resulting Standardized Groundwater Level Index values

Wartości standaryzowanego wskaźnika wód podziemnych <i>Values of the Standardized Groundwater Level Index</i>	Kategoria suszy <i>Drought category</i>
0 ÷ -0,99	łagodna susza / <i>mild drought</i>
-1,00 ÷ -1,49	umiarkowana susza <i>medium drought</i>
-1,50 ÷ -1,99	intensywna susza <i>intense drought</i>
≤ -2,00	ekstremalna susza <i>extreme drought</i>

nych (wilgotność gleby, przepływ w rzekach, wody podziemne). Warunki wilgotnościowe gleb odpowiadają anomalii opadowym w relatywnie krótkim czasie, zaś przepływ w rzekach, wody podziemne oraz zasilanie zbiorników reagują na anomalie opadowe trwające dłuższy czas. Z tego powodu McKee i in. (1993) proponowali liczenie wskaźnika SPI dla 3-, 6-, 12-, 24-, i 48-miesięcznej skali czasowej (Tokarczyk, 2008). Przypuszcza się, że w wodach podziemnych w przypadku wyznaczenia wskaźnika dla pierwszego poziomu wodonośnego deficyty wody zidentyfikowane przez dłuższe kroki czasowe będą odzwierciedlały potencjalny wpływ suszy na głębsze poziomy wodonośne. Pojedyncze krótkotrwałe epizody posuszne nie będą miały istotnego znaczenia dla głębszych poziomów. Jednak im dłużej utrzymują się niskie stany wód w płytkim poziomie lub pojawia się większe zagęszczenie krótkotrwałych zdarzeń, tym jest większa potencjalna możliwość reakcji na nie w głębszych warstwach wodonośnych. Na pytanie jak interpretować wyniki dla różnych kroków czasowych zastosowanych do wyznaczenia wskaźnika w warstwach wodonośnych na różnych głębokościach, będzie można jednak odpowiedzieć dopiero po przeprowadzeniu szerszych badań. Do tej pory w ramach prac nad adaptacją standaryzowanego wskaźnika do potrzeb monitorowania suszy w wodach podziemnych analizowano poziomy, w których strop na ogół nie zalegał na głębokości większej względem powierzchni terenu niż -20 m.

Na rycinie 2 przedstawiono sytuację hydrogeologiczną w kraju w latach 2015–2016 przy zastosowaniu proponowanego standaryzowanego wskaźnika dla kroku czasowego: 1 rok (ryc. 2A–B) i 3 miesiące (wybrane kwartały roku: I i III) (ryc. 2C–F). Wykorzystano w tym celu wyniki monitoringu ilościowego z czynnych punktów sieci obserwacyjno-badawczej wód podziemnych Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego, które dysponują co najmniej 20-letnim okresem obserwacji i reprezentują płytkie wody podziemne, tzn. warstwy wodonośne o zwierciadle swobodnym lub w których zwierciadło znajduje się pod lokalnym, względnie niewielkim ciśnieniem (wody pozostające pod ciśnieniem piezometrycznym, sięgającym ponad strop warstwy wodonośnej do 10 m). W sumie analizie poddano 177 punktów badawczych. Na rycinie 2 przyjęto klasyfikację intensywności suszy w wodach podziemnych w zależności od wartości wskaźnika zgodnie z tabelą 1.

Lata 2015–2016 to czas występowania zjawiska niżówki hydrogeologicznej na znacznym obszarze kraju.

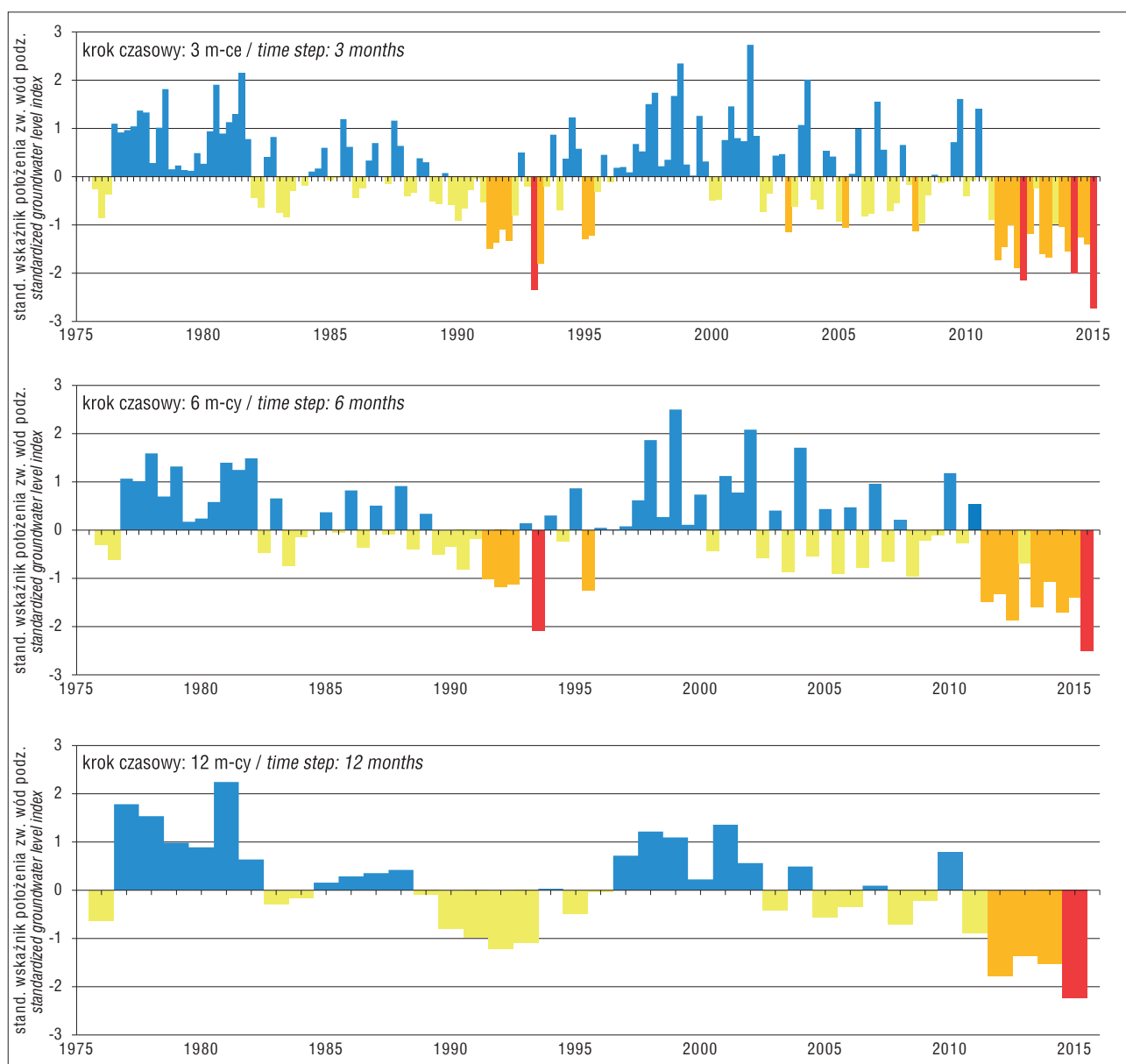
Znajduje to odzwierciedlenie w wartościach wskaźnika, które kształtują się w większej części punktów poniżej zera (ryc. 2D–F; ryc. 4). Przy czym wartości mniejsze od  $-2$  wskazują na ekstremalnie niskie stany wód. Z analizy wartości wskaźnika i liczby punktów wskazujących na stan suszy intensywnej i ekstremalnej należy wnioskować, że rozważane lata w skali kraju w przypadku płytkich wód podziemnych były szczególnie suche, biorąc pod uwagę cały analizowany okres prowadzenia pomiarów.

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W wyniku adaptacji standaryzowanego wskaźnika opadów SPI do potrzeb monitorowania suszy w wodach podziemnych przedstawiono nowe narzędzie do oceny sytuacji hydrogeologicznej. Wskaźnik ten przejął po swoim pierwowzorze jego zalety i charakteryzuje się tym, że:

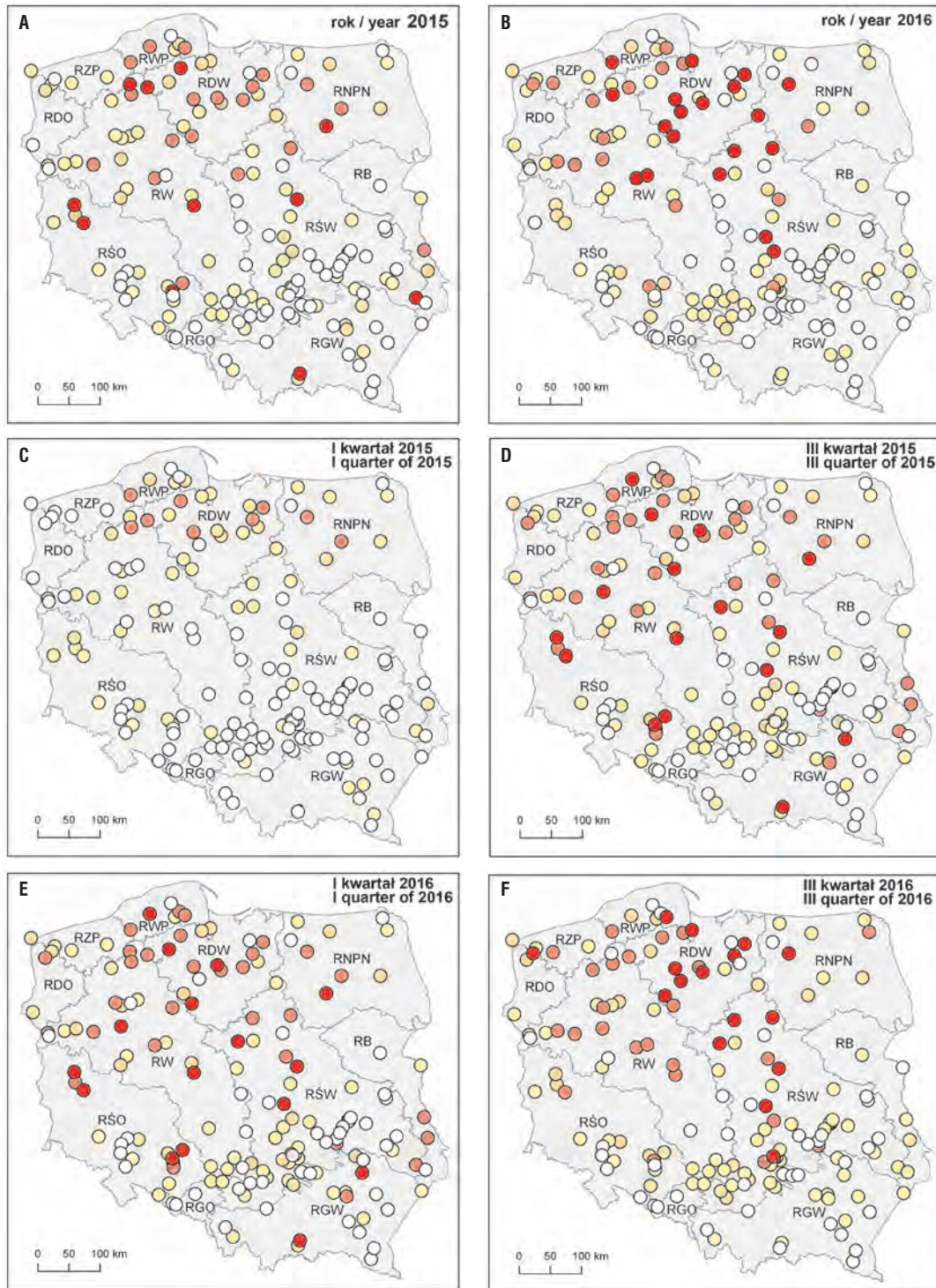
- umożliwia ocenę intensywności suszy bieżącej sytuacji hydrogeologicznej;
- może być stosowany w podobny sposób w różnych warunkach klimatycznych, co umożliwia porównywanie intensywności suszy w różnych punktach badawczych;
- można go określić dla różnych kroków czasowych;
- jest jednoznacznie związany z prawdopodobieństwem występowania danych stanów wód podziemnych;
- dzięki swojej znormalizowanej skali w łatwy sposób może jednocześnie służyć do monitorowania okresów zarówno suchych, jak i mokrych;
- może służyć do wczesnego ostrzegania o niskich stanach wód;
- jest prosty w użyciu.

Ponadto dzięki zastosowaniu analogicznej metodyki jak w przypadku wskaźnika SPI, ułatwia porównanie między sobą wyników obserwacji dwóch ważnych elementów



**Ryc. 1.** Standaryzowany wskaźnik wód podziemnych na przykładzie wyliczeń dla punktu obserwacyjnego nr I/211/3 należącego do sieci obserwacyjno-badawczej wód podziemnych PIG-PIB

**Fig. 1.** Standardized groundwater level index on the example of calculations for monitoring point I/211/3 belonging to the PGI-NRI groundwater observation network



Kategoria suszy w punkcie obserwacyjnym:  
*Drought category in observation point:*

- brak suszy / lack of drought
- łagodna susza / mild drought
- umiarkowana susza / medium drought
- intensywna susza / intense drought
- ekstremalna / extreme drought

Regiony hydrogeologiczne\*:  
 Hydrogeological regions\*:

- |  |   |
|--|---|
| RDW – region dolnej Wisły<br><i>Lower Vistula region</i>     | RNP – region Narwi, Pregoty i Niemna<br><i>Narew, Pregota and Niemen region</i> |
| RŚW – region środkowej Wisły<br><i>Middle Vistula region</i> | RW – region wschodniopomorski<br><i>Eastern Pomeranian region</i>               |
| RGW – region górnej Wisły<br><i>Upper Vistula region</i>     | RZ – region zachodniopomorski<br><i>Western Pomeranian region</i>               |
| RDO – region dolnej Odry<br><i>Lower Odra region</i>         | RB – region Bugu / Bug region   |
| RŚO – region środkowej Odry<br><i>Middle Odra region</i>     | RW – region Warty / Warta region  |
| RGO – region górnej Odry<br><i>Upper Odra region</i>         |   |

\*wg Paczyńskiego i Sadurskiego, 2017  
 \*after Paczyński and Sadurski, 2017



**Ryc. 2.** Wyniki obliczonego proponowanego standaryzowanego wskaźnika oceny intensywności suszy dla wód podziemnych dla okresu pomiarów 2015–2016: **A–B** wyniki uzyskane dla kroku czasowego równego 1 rokowi kalendarzowemu, **C–F** odpowiednio wyniki dla kroku czasowego równego: 3 miesiącom. Klasyfikację intensywności suszy przyjęto zgodnie z tabelą 1

**Fig. 2.** Results of the calculated standardized groundwater level index for the period 2015–2016: **A–B** results obtained for a time step: 1 year, **C–F** results for a time step of 3 months. Classification of drought intensity is according to table 1

cyklu hydrologicznego: sum opadów atmosferycznych i położenia zwierciadła wód podziemnych. Integracja monitoringu suszy i kompleksowego opisu tego zjawiska stanowi dodatkową wartość.

Wstępne testy pilotażowe adaptowanego indykatora, które przeprowadzono na terenie Polski (Raport..., 2016), wskazują na wysoką użyteczność jego zastosowania w monitorowaniu niskich stanów wód podziemnych w pierwszym poziomie wodonośnym. Nowy wskaźnik można wykorzystywać do interpretacji bieżącej sytuacji hydrogeologicznej zarówno w skali regionalnej, jak i lokalnej. Potencjał możliwości praktycznego zastosowania opisanego wskaźnika przewyższa ten, który posiadają indykatory obecnie wykorzystywane do monitorowania suszy w wodach podziemnych w kraju i na świecie.

Autorka pragnie bardzo podziękować Panu Pawłowi Januszewskiemu z firmy StatSoft Polska Sp. z o.o. za konsultacje w zakresie matematyki i za pomoc w opracowaniu formuły prezentowanego w tej pracy wskaźnika oraz Recenzentom artykułu za trafne i wnikliwe uwagi przyczyniające się do podniesienia jego wartości. Badania nad adaptacją wskaźnika SPI do potrzeb monitorowania suszy w wodach podziemnych prowadzono w ramach działalności państwowej służby hydrogeologicznej w zakresie szukania nowych efektywnych sposobów oceny bieżącej sytuacji hydrogeologicznej w kraju i wczesnego ostrzegania przed niskimi stanami wód. Finasowanie prac nastąpiło ze środków NFOŚiGW w ramach realizacji tematu PSH nr 28 pt.:

„Opracowywanie prognoz sytuacji hydrogeologicznej i ostrzeżeń przed niebezpiecznymi zjawiskami zachodzącymi w strefach zasilania lub poboru wód podziemnych” zgodnie z zapisami umowy nr 521/2015/Wn-07/FG-HG-DN/D zawartej w dniu 24.11.2015 r.

## LITERATURA

- KOMUSCU A.U. 1999 – Using the SPI to Analyze Spatial and Temporal Patterns of Drought in Turkey. *Drought Network News*, 11: 7–13.
- GAŚSIÓREK E., GRZĄDZIE M., MUSIAŁ E., ROJEK M. 2012 – Porównanie wskaźnika standaryzowanego opadu (SPI) wyznaczonego za pomocą rozkładu gamma i rozkładu normalnego dla miesięcznych sum opadów. Nr 3/III/2012, PAN, Oddział w Krakowie, s. 197–208.
- KACZMAREK Z. 1970 – Metody statystyczne w hydrologii i meteorologii. WKiŁ, Warszawa, s. 312.
- MCKEE T.B., DOESKEN N.J., KLEIST J. 1993 – The relationship of drought frequency and duration to time scales. [W:] Proc. 8<sup>th</sup> Conf. Applied Climatology. 17–22 January 1993, Anaheim, California, s. 179–184.
- MCKEE T.B., DOESKEN N.J., KLEIST J. 1995 – Drought monitoring with multiple time scales. [W:] Preprints 9<sup>th</sup> Conf. Applied Climatology. 15–20 January 1995, Dallas, Texas, s. 233–236.
- RAPORT z zadania PSH NR 28, 2016 – Opracowywanie prognoz sytuacji hydrogeologicznej i ostrzeżeń przed niebezpiecznymi zjawiskami zachodzącymi w strefach zasilania lub poboru wód podziemnych (niepubl.). PIG–PIB [arch. PSH], Warszawa.
- PACZYŃSKI B., SADURSKI A. (red.) 2007 – Hydrogeologia regionalna Polski. T. 1. Wody słodkie. Państw. Inst. Geol., s. 538.
- TOKARCZYK T. 2008 – Wskaźniki oceny suszy stosowane w Polsce i na świecie. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 07: 167–182.
- TOKARCZYK T., SZALIŃSKA W. 2014 – Combined analysis of precipitation and water deficit for drought hazard assessment. *Hydrolog. Sci. J.*, 59 (9): 1675–1689.