

## **PORÓWNANIE WSKAŹNIKÓW: STANDARYZOWANEGO OPADU (SPI), STANDARYZOWANEJ EWAPOTRANSPIRACJI WSKAŹNIKOWEJ (SEI) ORAZ STANDARYZOWANEGO KLIMATYCZNEGO BILANSU WODNEGO (SKBW)**

**Marian Rojek<sup>1</sup>, Elżbieta Musiał<sup>2</sup>, Edward Gąsiołek<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Instytut Kształtowania i Ochrony Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław; tel.71-3205-576, e-mail: marian.rojek@up.wroc.pl

<sup>2</sup> Katedra Matematyki, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

### **STRESZCZENIE**

Za pomocą wskaźników standaryzowanego opadu (SPI), standaryzowanej ewapotranspiracji wskaźnikowej (SEI) oraz standaryzowanego klimatycznego bilansu wodnego (SKBW) przeanalizowano warunki wilgotnościowe w okresie wegetacji w wieloletniu 1964–2006 we Wrocławiu-Swojcu. SPI i SEI wyznaczono przy założeniu, że rozkłady empiryczne miesięcznych sum opadów oraz miesięcznych sum ewapotranspiracji wskaźnikowej dla danych pochodzących ze stacji Wrocław-Swojec są rozkładami gamma. Ponieważ miesięczne sumy klimatycznego bilansu wodnego w miesiącach okresu wegetacyjnego w wieloletniu 1964–2006 we Wrocławiu-Swojcu podlegają rozkładowi normalnemu, wyznaczenie SKBW polegało na standaryzacji KBW. Celem pracy było porównanie trzech wskaźników: standaryzowanego opadu (SPI), standaryzowanej ewapotranspiracji wskaźnikowej (SEI) oraz standaryzowanego klimatycznego bilansu wodnego (SKBW).

**Słowa kluczowe:** ewapotranspiracja wskaźnikowa, opad atmosferyczny, klimatyczny bilans wodny.

## **THE COMPARISON OF STANDARDIZED PRECIPITATION INDEX (SPI), STANDARDIZED REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION INDEX (SEI) AND STANDARDIZED CLIMATIC WATER BALANCE (SCWB)**

### **SUMMARY**

The standardized precipitation index (SPI), standardized reference evapotranspiration index (SEI) and standardized climatic water balance (SCWB) were used to analyze the humidity conditions in the vegetation period of years 1964–2006 in Wrocław-Swojec Observatory. SPI and SEI were calculated on the assumption that empirical monthly precipitation sums and monthly sums of reference evapotranspiration, obtained from Wrocław-Swojec data, are gamma distributed. Since monthly sums of climatic water balance for analogous data are normally distributed, CWB required standardization to SCWB. The aim of study was to compare those three indexes: standardized precipitation index (SPI), standardized reference evapotranspiration index (SEI) and standardized climatic water balance (SCWB).

**Keywords:** reference evapotranspiration, precipitation, climatic water balance.

## WSTĘP

Klimatyczny bilans wodny (KBW) jest wskaźnikiem umożliwiającym określenie stanu uwilgotnienia środowiska lub inaczej oceny aktualnych zasobów wodnych przy wykorzystaniu danych meteorologicznych. KBW jest określany jako różnica pomiędzy przychodami wody w postaci opadów a stratami w procesie parowania wyrażonymi za pomocą ewapotranspiracji wskaźnikowej. Po raz pierwszy pojęcie to, do polskiej literatury naukowej, wprowadzono pod koniec lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku [Bac i Rojek, 1979], a obszerne opracowanie rozkładu przestrzennego w Polsce dla okresu 40-letniego przedstawił kilkanaście lat później Rojek [1994]. Wartości KBW mogą posłużyć także do szacowania potrzeb nawodnieniowych roślin. O monitorowaniu warunków suszy w Polsce za pomocą wskaźnika klimatycznego bilansu wodnego pisali m.in.: Farat i in. [1995], Kanecka-Geszke i in. [2007], Mizak i in. [2011], Wibig [2012], Radzka [2014]. W Polsce Łabędzki i Bąk [2004] wprowadzili standaryzowany klimatyczny bilans wodny  $KBW_S$ , do którego wyznaczenia wykorzystali ewapotranspirację wskaźnikową wyznaczoną metodą Penmana-Monteitha. Celem pracy było porównanie trzech wskaźników: standaryzowanego opadu (SPI), standaryzowanej ewapotranspiracji wskaźnikowej (SEI) oraz standaryzowanego klimatycznego bilansu wodnego (SKBW).

## METODYKA

Wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej wyznaczono ze wzoru Penmana-Monteitha w modyfikacji Allena [Allen i inni 1994a, 1994b]:

$$ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho c_p d / r_a}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_c}{r_a})} \cdot \frac{n}{28.34} \quad (1)$$

gdzie:  $R_n$  – saldo promieniowania [ $Wm^{-2}$ ] oblicza się wg wzoru [Kędziora, 1999]:

$$R_n = (1 - \alpha)(0,22 + 0,54u)G_0 - T_a^4(0,56 - 0,08\sqrt{e_a})(0,1 + 0,9u), \quad u = \frac{S}{S_0}$$

– usłonecznienie względne,  $S$  – suma dekadowa wartości usłonecznienia w godzinach;  $S_0$  – suma dekadowa wartości usłonecznienia astronomicznie możliwego w godzinach;  $G_0$  – średnia dekadowa suma dzienna promieniowania słonecznego na górnej granicy atmosfery [ $cal \cdot cm^{-2} \cdot doba^{-1}$ ]. Zarówno  $S_0$  jak i  $G_0$  są stabilizowane i zostały wprowadzone do programu *Bilans Ciepły* wyznaczającego wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej.

$T_a$  – temperatura powietrza na poziomie pomiarowym 2 m nad powierzchnią parującą w skali bezwzględnej [K].

$\gamma$  – stała Stefana Boltzmanna  $5,67032 \cdot 10^{-8}$  [ $Wm^{-2} \cdot K^{-4}$ ],

$e_a$  – ciśnienie pary wodnej na poziomie pomiarowym na wysokości 2 m nad powierzchnią parującą [hPa];

$G$  – strumień ciepła glebowego [ $\text{Wm}^{-2}$ ],  $G = 0.2 R_n$ ,

$\frac{\Delta}{\gamma}$  – funkcja temperatury w zakresie od  $0^\circ\text{C}$  do  $25^\circ\text{C}$  może być wyliczone z następującego równania [Kędziora, 1999]:

$$\frac{\Delta}{\gamma} = 0,688 \exp(0,05662t^\circ\text{C}),$$

$d$  – niedosyt wilgotności powietrza [hPa]; do wyznaczenia niedosytu wilgotności powietrza niezbędne są wartości ciśnienia nasyconej pary wodnej w [hPa] (wartości ciśnienia nasyconej pary wodnej w [hPa] w zależności od temperatury powietrza w [ $^\circ\text{C}$ ] są stabilizowane i wprowadzone do programu *BilansCieplny* wyznaczającego wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej);

$\rho c_p$  – objętościowa pojemność cieplna powietrza [ $1250 \text{ Jm}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ ],

$n$  – liczba dni dla okresu, (doba  $n=1$ ; dekada  $n=10$  lub  $11$ ; miesiąc  $n=30$  lub  $31$ ),  
28,34 – współczynnik przeliczający gęstość strumienia energii wykorzystanej na parowanie z [ $\text{Wm}^{-2}$ ] na milimetry na dobę.

Do wyznaczenia wartości  $ET_0$  potrzebne są następujące czynniki meteorologiczne:

- temperatura powietrza na poziomie pomiarowym 2 m nad powierzchnią parującą [ $^\circ\text{C}$ ],
- prędkość wiatru na wysokości 2 m nad powierzchnią parującą [ $\text{ms}^{-1}$ ],
- ciśnienie pary wodnej na poziomie pomiarowym 2 m nad powierzchnią parującą [hPa],
- usłonecznienie rzeczywiste [godz].

Przy wyznaczaniu ewapotranspiracji wskaźnikowej przyjęto za [Allen i in. 1994a, 1994b], że jest to ewapotranspiracja hipotetycznej rośliny, jaką jest trawa o stałej jednakowej wysokości równej 12 cm, stałym albedo wynoszącym 0,23, w pełni zakrywająca glebę w warunkach aktywnego rozwoju i nieograniczonego dostępu wody oraz stałej oporności stomatycznej równej  $70 \text{ sm}^{-1}$ . Przy obliczeniach oporu aerodynamicznego dla hipotetycznej rośliny, jaką jest trawa o stałej wysokości  $h$  równej 12 cm uwzględniono następujące warunki [Allen, i in. 1994a, 1994b]:

$$h = 12 \text{ cm}, d = 2/3h, z_o = 0,123h, z_h = 0,1 z_o$$

Wymienione zależności wskazują na wartość oporu aerodynamicznego  $r_a = \frac{208}{v}$  który jest funkcją zmiennej prędkości wiatru mierzonej na wysokości 2 m.

Przy założeniu, że miesięczne sumy ewapotranspiracji wskaźnikowej i opadów w okresie wegetacji w wieloleciu 1964–2006 we Wrocławiu-Swojcu podlegają rozkładowi gamma zaproponowano jako przybliżenie parametrów skali i kształtu rozkładu gamma, estymatory tych parametrów wyznaczone przez Thoma [1958] metodą największej wiarygodności. Następnie opierając się na propozycji Abramowitza i Steguna [1965] dokonano przybliżonej transformacji miesięcznych sum ewapotranspiracji wskaźnikowej podlegających rozkładowi gamma do standardowego rozkładu normalnego, a następnie wyznaczono wskaźniki, na podstawie których można ocenić warunki wilgotnościowe. Opis przedstawionej powyżej metodyki znajduje się w pracy [Gąsiorek i in., 2012]. Przy założeniu, że miesięczne sumy klimatycznego bilansu wodnego podlegają rozkładowi normalnemu, standaryzowany wskaźnik klimatycz-

nego bilansu wodnego został wyznaczony poprzez standaryzację zmiennej losowej KBW o rozkładzie normalnym [Łabędzki i in. 2004]. Założenia dotyczące rozkładów empirycznych miesięcznych sum ewapotranspiracji, opadów i klimatycznego bilansu wodnego w okresie wegetacji wymagały weryfikacji hipotezy o zgodności rozkładów empirycznych z rozkładami teoretycznymi za pomocą testu  $\chi^2$ . Porównanie trzech wyznaczonych wskaźników: standaryzowanego opadu (SPI), standaryzowanej ewapotranspiracji wskaźnikowej (SEI) oraz standaryzowanego klimatycznego bilansu wodnego (SKBW) zostało wykonane na podstawie danych z okresu wegetacji w wieloleciu 1964–2006 we Wrocławiu-Swojcu.

## WYNIKI BADAŃ

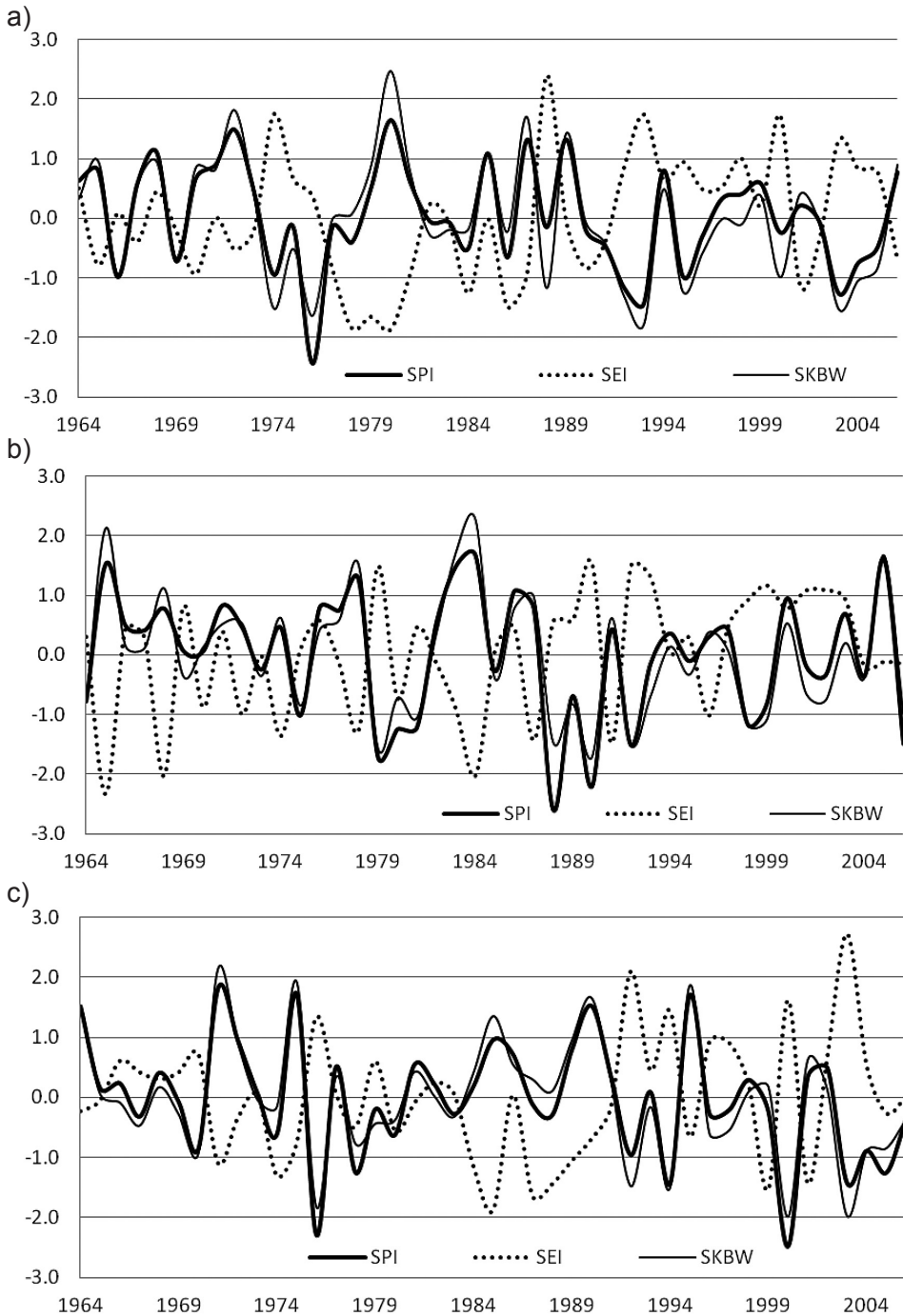
Wyniki weryfikacji hipotezy o zgodności z rozkładem gamma miesięcznych sum opadów i miesięcznych sum ewapotranspiracji wskaźnikowej oraz zgodności miesięcznych sum klimatycznego bilansu wodnego z rozkładem normalnym w okresie wegetacji za pomocą testu  $\chi^2$  znajdują się w tabeli 1.

**Tabela 1.** Weryfikacja hipotezy o zgodności z rozkładem gamma miesięcznych sum opadów i ewapotranspiracji wskaźnikowej oraz zgodności z rozkładem normalnym miesięcznych sum KBW w okresie wegetacji w latach 1964–2006 dla Wrocławia-Swojca

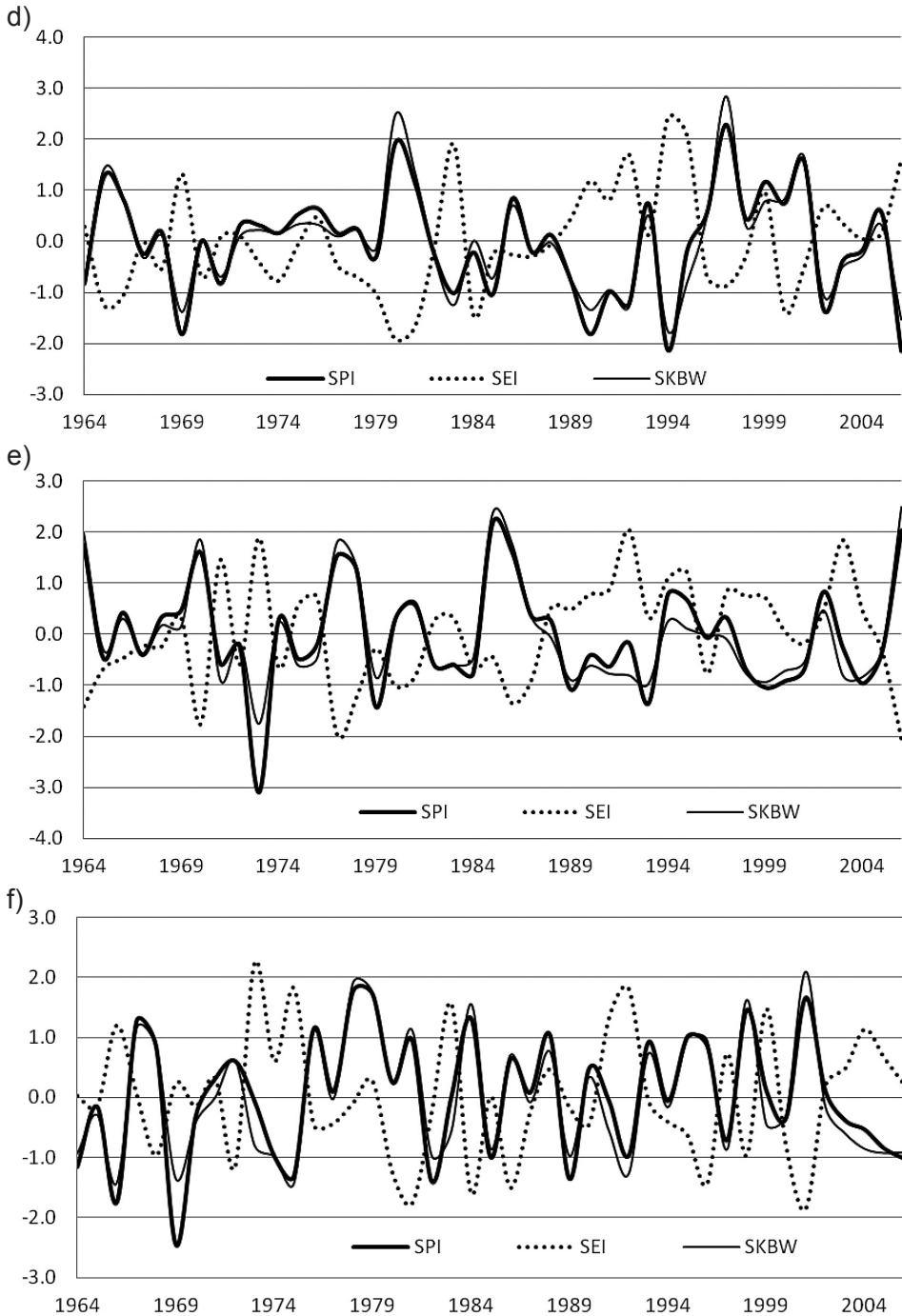
Miesiąc	Ewapotranspiracja wskaźnikowa			Opad			Klimatyczny bilans wodny		
	p-value	parametr		p-value	parametr		p-value	parametr	
		kształtu- $\alpha$	skali- $\beta$		kształtu- $\alpha$	skali- $\beta$		$\mu$	$\sigma$
Kwiecień	0,97	62,49	0,88	0,24	11,3	3,33	0,95	-17,8	20,84
Maj	0,53	49,43	1,66	0,62	21,19	2,67	0,17	-25,12	39,59
Czerwiec	0,33	61,39	1,45	0,54	13,17	5,40	0,39	-19,00	36,25
Lipiec	0,40	42,55	2,24	0,41	33,33	2,57	0,52	-11,11	62,94
Sierpień	0,07	41,17	2,00	0,08	25,46	2,85	0,004	-9,38	53,69
Wrzesień	0,56	49,35	0,96	0,66	17,14	2,53	0,27	-2,88	30,32

Następnie wykorzystując równanie (1) wyznaczono dla kolejnych miesięcy okresu wegetacyjnego w wieloleciu 1945–2003 wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej. Wskaźnik standaryzowanej ewapotranspiracji wskaźnikowej (SEI) wyznaczono w oparciu o metodykę, której opis znajduje się w pracy [Gąsiorek i in., 2012]. Podobnie wyznaczono wskaźnik standaryzowanego opadu (SPI). Wskaźnik SKBW został wyznaczony poprzez standaryzację zmiennej losowej KBW. Wyznaczone wskaźniki SPI, SEI oraz SKBW przedstawiono graficznie na rysunkach 1–6.

Przeprowadzona dokładna analiza rysunku 1 (od a do f) na podstawie zaproponowanej klasyfikacji zawartej w tabeli 2 i w tabeli 3, wyraźnie wskazuje na następującą prawidłowość: miesiąc ekstremalnie suchy według SPI ( $SPI \leq -2,0$ ) ma wskaźniki



**Rys. 1.** Porównanie SPI, SEI oraz SKBW dla Wrocławia-Swojca (1964–2006) w miesiącach: a) kwietniu, b) maju, c) czerwcu



**Rys. 1.** Porównanie SPI ,SEI oraz SKBW dla Wrocławia-Swojca (1964–2006) w miesiącach: d) lipcu, e) sierpniu, f) wrześniu

**Tabela 2.** Klasyfikacja warunków opadowych według wskaźnika standaryzowanego opadu (SPI) i odpowiadające im prawdopodobieństwa [McKee, Doesken i Kleist 1993, 1995; Łabędzki 2006a]

SPI	Okres	Prawdopodobieństwa
$SPI \leq -2,0$	ekstremalnie suchy	$P(SPI \leq -2) = 0,02$
$-2,00 < SPI \leq -1,50$	bardzo suchy	$P(-2 < SPI \leq -1,5) = 0,04$
$-1,50 < SPI \leq -0,50$	suchy	$P(-1,5 < SPI \leq -0,5) = 0,25$
$-0,5 < SPI < 0,5$	normalny	$P(-0,5 < SPI < 0,5) = 0,38$
$0,5 \leq SPI < 1,5$	wilgotny	$P(0,5 \leq SPI < 1,5) = 0,25$
$1,5 \leq SPI < 2$	bardzo wilgotny	$P(1,5 \leq SPI < 2) = 0,04$
$SPI \geq 2$	ekstremalnie wilgotny	$P(SPI \geq 2) = 0,02$

**Tabela 3.** Klasyfikacja warunków opadowych według wskaźnika standaryzowanej ewapotranspiracji wskaźnikowej (SEI) i odpowiadające im prawdopodobieństwa

SEI	Okres	Prawdopodobieństwa
$SEI \leq -2,0$	ekstremalnie wilgotny	$P(SEI \leq -2) = 0,02$
$-2,00 < SEI \leq -1,50$	bardzo wilgotny	$P(-2 < SEI \leq -1,5) = 0,04$
$-1,50 < SEI \leq -0,50$	wilgotny	$P(-1,5 < SEI \leq -0,5) = 0,25$
$-0,5 < SEI < 0,5$	normalny	$P(-0,5 < SEI < 0,5) = 0,38$
$0,5 \leq SEI < 1,5$	suchy	$P(0,5 \leq SEI < 1,5) = 0,25$
$1,5 \leq SEI < 2$	bardzo suchy	$P(1,5 \leq SEI < 2) = 0,04$
$SEI \geq 2$	ekstremalnie suchy	$P(SEI \geq 2) = 0,02$

**Tabela 4.** Ocena zgodności współczynników SPI i SKBW

Miesiąc	Procent identycznych zakwalifikowań			Procent identycznych lub sąsiednich zakwalifikowań		
	SPI-SEI	SEI-SKBW	SPI-SKBW	SPI-SEI	SEI-SKBW	SPI-SKBW
Kwiecień	37%	42%	63%	81%	88%	100%
Maj	30%	56%	60%	79%	86%	88%
Czerwiec	35%	49%	74%	70%	79%	98%
Lipiec	42%	49%	77%	88%	86%	98%
Sierpień	33%	42%	79%	81%	91%	100%
Wrzesień	44%	44%	79%	81%	84%	91%

**Tabela 5.** Klasyfikacja warunków opadowych we wrześniu w wieloleciu 1964–2006 we Wrocławiu-Swojcu za pomocą SPI oraz SKBW

Rok	SPI	Klasyfikacja	SKBW	Klasyfikacja	1 - ta sama klasa 0 - różne klasy
1964	-1,2	suchy	-0,9	suchy	1
1965	-0,2	normalny	-0,3	normalny	1
1966	-1,7	bardzo suchy	-1,4	suchy	0
1967	1,3	wilgotny	1,1	wilgotny	1
1968	0,8	wilgotny	0,8	wilgotny	1
1969	-2,5	ekstra suchy	-1,4	suchy	0
1970	-0,3	normalny	-0,4	normalny	1
1971	0,3	normalny	0,0	normalny	1
1972	0,6	wilgotny	0,6	wilgotny	1
1973	-0,1	normalny	-0,8	suchy	0
1974	-1,0	suchy	-1,0	suchy	1
1975	-1,3	suchy	-1,4	suchy	1
1976	1,1	wilgotny	1,1	wilgotny	1
1977	0,1	normalny	0,0	normalny	1
1978	1,8	bardzo wilg.	1,9	bardzo wilg.	1
1979	1,7	bardzo wilg.	1,7	bardzo wilg.	1
1980	0,2	normalny	0,3	normalny	1
1981	0,9	wilgotny	1,1	wilgotny	1
1982	-1,4	suchy	-1,0	suchy	1
1983	0,0	normalny	-0,6	suchy	0
1984	1,3	wilgotny	1,5	bardzo wilg.	0
1985	-1,0	suchy	-0,9	suchy	1
1986	0,6	wilgotny	0,7	wilgotny	1
1987	0,1	normalny	-0,1	normalny	1
1988	1,0	wilgotny	0,8	wilgotny	1
1989	-1,4	suchy	-1,0	suchy	1
1990	0,5	normalny	0,3	normalny	1
1991	-0,1	normalny	-0,6	suchy	0
1992	-1,0	suchy	-1,3	suchy	1
1993	0,9	wilgotny	0,7	wilgotny	1
1994	-0,1	normalny	-0,2	normalny	1
1995	1,0	wilgotny	1,0	wilgotny	1
1996	0,9	wilgotny	0,9	wilgotny	1
1997	-0,7	suchy	-0,9	suchy	1
1998	1,4	wilgotny	1,6	bardzo wilg.	0
1999	0,1	normalny	-0,5	normalny	1
2000	-0,4	normalny	-0,3	normalny	1
2001	1,7	bardzo wilg.	2,1	ekstra wilg.	0
2002	0,1	normalny	-0,2	normalny	1
2003	-0,4	normalny	-0,6	suchy	0
2004	-0,5	suchy	-0,9	suchy	1
2005	-0,9	suchy	-0,9	suchy	1
2006	-1,0	suchy	-0,9	suchy	1



SEI  $\geq 2$ ). Podobnie, dla miesiąca wilgotnego, wskaźnik SPI ma wartość ( $0,5 \leq \text{SPI} < 1,50$ ) a wskaźnik SEI ( $-1,50 < \text{SEI} \leq -0,50$ ). Relacje pomiędzy tymi wskaźnikami przy ocenie warunków wilgotnościowych wskazują na odwrotną relację pomiędzy nimi, co jest potwierdzeniem znanego faktu, że wraz ze wzrostem opadów maleją możliwości wchłaniania pary wodnej przez warstwę atmosfery leżącą nad powierzchnią parującą, które szacuje się za pomocą ewapotranspiracji wskaźnikowej. Oczywiście te relacje są obciążone pewnym błędem a ocena zgodności zawarta w tabeli 4 potwierdza ten fakt. Z analizy przedstawionych rysunków wynika także fakt, że wskaźniki SPI i SKBW w poszczególnych miesiącach okresu wegetacyjnego mają zbliżone wartości.

Biorąc pod uwagę zaproponowane metody identyfikacji okresów miesięcznych od ekstremalnie suchych do ekstremalnie wilgotnych ocenę zgodności za pomocą SPI oraz SEI zamieszczono w tabeli 4. Ocenę zgodności wskaźników SPI, SEI i SKBW przeprowadzono wyznaczając procent identycznych zaklasyfikowań oraz zaklasyfikowań identycznych i sąsiadujących.

Dla potwierdzenia faktu, że wskaźniki SPI i SKBW w poszczególnych miesiącach okresu wegetacyjnego mają zbliżone wartości, przykładowo w tabeli 5, przedstawiono klasyfikację warunków wilgotnościowych we wrześniu w wieloleciu 1964–2006 we Wrocławiu-Swojcu za pomocą SPI oraz SKBW.

Zgodność identyfikacji we wrześniu w wieloleciu 1964–2006 we Wrocławiu Swojcu wynosi 79%, a analizując wyniki zawarte w tabeli 4 widzimy, że zgodność pomiędzy SPI i SKBW w kolejnych miesiącach okresu wegetacyjnego zmienia się od 63% w kwietniu do 79% w lipcu. Relacje pomiędzy SPI, SEI oraz SKBW najlepiej opisują wartości współczynników korelacji pomiędzy tymi wskaźnikami, które znajdują się w tabeli 6.

Wartości współczynników korelacji odzwierciedlają relacje przedstawione na rysunku 1 (od a do f). Zależności pomiędzy SEI i SPI oraz SEI i SKBW są ujemne, co oznacza, że ze wzrostem jednego wskaźnika drugi maleje, natomiast zależność pomiędzy SPI i SKBW jest dodatnia i bliska 100%, co jest potwierdzeniem bardzo zbliżonych wartości obu tych wskaźników.

**Tabela 6.** Wartości współczynników korelacji pomiędzy wskaźnikami SPI, SEI oraz SKBW

Miesiąc	Współczynnik korelacji		
	SPI-SEI	SEI-SKBW	SPI-SKBW
Kwiecień	-0,39	-0,66	0,93
Maj	-0,65	-0,75	0,94
Czerwiec	-0,54	-0,72	0,96
Lipiec	-0,70	-0,76	0,97
Sierpień	-0,60	-0,75	0,94
Wrzesień	-0,50	-0,67	0,95

Zależności pomiędzy SEI i SPI, SEI i SKBW oraz SPI i SKBW są statystycznie istotne na poziomie istotności 0,05.

## WNIOSKI

1. Miesięczne sumy ewapotranspiracji wskaźnikowej oraz opadów w okresie wegetacji w wieloleciu 1964–2006 we Wrocławiu-Swojcu podlegają rozkładowi gamma, natomiast miesięczne sumy klimatycznego bilansu wodnego w tym samym okresie badawczym podlegają rozkładowi normalnemu.
2. Wskaźniki SPI i SKBW identyfikują warunki wilgotnościowe w miesiącach okresu wegetacyjnego w wieloleciu 1964–2006 we Wrocławiu-Swojcu w sposób bardzo zbliżony, co potwierdza wartość współczynnika korelacji pomiędzy tymi wskaźnikami.
3. Zależności pomiędzy wskaźnikami SEI i SPI oraz SEI i SKBW wskazują na odwrotną relację pomiędzy nimi. Wartości współczynników korelacji pomiędzy SEI i SPI oraz SEI i SKBW są ujemne, co oznacza, że ze wzrostem jednego wskaźnika drugi maleje. Jest to potwierdzeniem znanego faktu, że wraz ze wzrostem opadów maleją możliwości wchłaniania pary wodnej przez warstwę atmosfery leżącą nad powierzchnią parującą, które szacuje się za pomocą ewapotranspiracji wskaźnikowej.

## LITERATURA

1. Abramowitz M., Stegun I.A., 1965. Handbook of Mathematical Formulas, Graphs and Mathematical Tables. Dover Publications: New York, ss. 1250.
2. Allen R.G., Smith M., Pereira L.S., Pereira A., 1994a. An update for the calculation of reference evapotranspiration. ICID Bulletin vol. 43, no 2, 35–92.
3. Allen R.G., Smith M., Pereira A., Pereira L.S., 1994b. An update for the definition of reference evapotranspiration. ICID Bulletin vol. 43, no 2, 1–34.
4. Bac S., Rojek M., 1979. Klimatyczny bilans wodny a odpływy w Polsce. Przegląd Geofizyczny, r. XXIV, z. 3-4, 293–298.
5. Edwards D.C., McKee T.B., 1997. Characteristics of 20<sup>th</sup> century drought in the United States at multiple scales. Climatology Report 97-2, Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins.
6. Gąsiorek E., Grządziel M., Musiał E., Rojek M., 2012. Porównanie wskaźnika standaryzowanego opadu (SPI) wyznaczonego za pomocą rozkładu gamma i rozkładu normalnego dla miesięcznych sum opadów. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich PAN 3/III 2012, 197–209.
7. Krishnamoorthy K., Mathew T., Mukherjee S. 2008. Normal-based methods for a Gamma Distribution: prediction and tolerance intervals and stress-strength reliability, Technometrics, February 2008, vol,50, no 1, 69–78.
8. Łabędzki L., Bąk B., 2004. Standaryzowany klimatyczny bilans wodny jako wskaźnik suszy. Acta Agrophysica. Vol. 3. No 1, 117–124.
9. Łabędzki L., 2006a. Susze rolnicze, Zarys problematyki oraz metody monitorowania i klasyfikacji, Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie. Rozprawy naukowe i monografie, Nr 17, ss. 107.

10. Łabędzki L., 2006b. O dwóch metodach wyznaczania wskaźnika suszy meteorologicznej SPI. *Mater. XXXVI Seminarium Zastosowań Matematyki*, 41–47.
11. McKee T.B., Doesken N.J., Kleist J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proc, 8<sup>th</sup> Conf, Applied Climatology*, 17-22 January 1993, Anaheim, California, 179–184.
12. McKee T. B., Doesken N, J., Kleist J., 1995. Drought monitoring with multiple time scales. *Preprints 9<sup>th</sup> Conf, Applied Climatology*, 15-20 January 1995, Dallas, Texas, 233–236.
13. Mizak K., Pudelko R., Kozyra J., Nieróbca A., Doroszewski A., Świtaj Ł., Łopatka A. 2011. Wyniki monitoring suszy rolniczej w uprawach pszenicy ozimej w Polsce w latach 2008–2010. *Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie*, t. 11, z. 2(34), 95–107.
14. Radzka E., 2014. Klimatyczny bilans wodny okresu wegetacyjnego (według wzoru Iwanowa) w środkowo-wschodniej Polsce. *Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie*, t. 14, z. 1(45), 67–76.
15. Rojek M., 1994. Rozkład przestrzenny klimatycznych bilansów wodnych na terenie Polski w okresie 1951–1990. *Zeszyty Naukowe AR we Wrocławiu, Inżynieria Środowiska VI*, nr 243, 9–21.
16. Thom H.C.S., 1958. A note on the gamma distribution. *Monthly Weather Review*, 86, 117–122.
17. Thornthwaite C.W., 1948. An approach towards rational classification of climate. *Geographical Review*, vol. 38, 55–94.
18. Wibig J., 2012. Warunki wilgotnościowe w Polsce w świetle wskaźnika standaryzowanego klimatycznego bilansu wodnego. *Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie*, t. 12, z. 2(38), 329–340.