

Wpłynęło 28.10.2011 r.  
Zrecenzowano 17.01.2012 r.  
Zaakceptowano 14.02.2012 r.

A – koncepcja  
B – zestawienie danych  
C – analizy statystyczne  
D – interpretacja wyników  
E – przygotowanie maszynopisu  
F – przegląd literatury

# WIELKOŚĆ I ZMIENNOŚĆ EWAPOTRANSPIRACJI WSKAŹNIKOWEJ WEDŁUG PENMANA-MONTEITHA W OKRESIE WEGETACYJNYM W LATACH 1970–2004 W WYBRANYCH REJONACH POLSKI

Leszek ŁABĘDZKI<sup>ACDEF</sup>, Bogdan BĄK<sup>CD</sup>,  
Ewa KANECKA-GESZKE<sup>BC</sup>

Instytut Technologiczno-Przyrodniczy, Kujawsko-Pomorski Ośrodek Badawczy w Bydgoszczy

## Streszczenie

Ewapotranspiracja wskaźnikowa jest bardzo ważnym parametrem agrometeorologicznym, określającym potencjalne możliwości parowania. Różnica między ewapotranspiracją wskaźnikową i opadem wskazuje na potencjalny niedobór lub nadmiar opadu. W ostatnich latach najszerzej stosowaną i zalecaną metodą określania ewapotranspiracji wskaźnikowej jest metoda Penmana-Monteitha. Stosując tę metodę, w pracy obliczono ewapotranspirację wskaźnikową w miesiącach okresu wegetacyjnego (kwiecień–wrzesień) w latach 1970–2004 na podstawie elementów meteorologicznych pomierzonych na wybranych trzech stacjach meteorologicznych IMGW z obszaru Polski: Kraków, Olsztyn i Poznań. Stacje te reprezentują zróżnicowane pod względem warunków pluwiotermicznych regiony agroklimatyczne.

W okresie wegetacyjnym od kwietnia do września suma ewapotranspiracji wskaźnikowej, liczonej tą metodą, wynosi średnio 470 mm w rejonie Olsztyna, 510 mm w rejonie Krakowa i 550 mm w rejonie Poznania. W poszczególnych miesiącach średnia ewapotranspiracja wskaźnikowa wynosi od 50–60 mm w kwietniu i wrześniu do 100–120 mm w pozostałych miesiącach okresu wegetacyjnego. Największa ewapotranspiracja wskaźnikowa występuje w lipcu. We wszystkich miesiącach największa ewapotranspiracja wskaźnikowa jest w Poznaniu, a najmniejsza w Olsztynie.

Ewapotranspiracja wskaźnikowa, liczona wzorem Penmana-Monteitha, wykazuje istotny i znaczny trend wzrostowy w latach 1970–2004 w trzech analizowanych rejonach, zarówno w większości miesięcy od kwietnia do września, jak i w całym tym okresie.

**Słowa kluczowe:** ewapotranspiracja wskaźnikowa, metoda Penmana-Monteitha

**Adres do korespondencji:** prof. dr hab. L. Łabędzki, Kujawsko-Pomorski Ośrodek Badawczy ITP w Bydgoszczy, ul. Glinki 60, 85-174 Bydgoszcz, tel. +48 52 375-01-07, e-mail: L.Labedzki@itep.edu.pl

## WSTĘP

Wpływ czynników meteorologicznych na wartość ewapotranspiracji można ująć kompleksowo w postaci ewapotranspiracji wskaźnikowej  $ET_o$ , która charakteryzuje meteorologiczne warunki procesu parowania i określa ewaporacyjną zdolność atmosfery. W warunkach nieograniczonego zasilania roślin i gleby w wodę ten czynnik decyduje o intensywności procesu ewapotranspiracji.

Ewapotranspiracja wskaźnikowa może być obliczana według formuł fizyczno-empirycznych na podstawie jedynie danych meteorologicznych (np. wzór Baca, Blaney-Cridde'a, Turca, Matula, Grabarczyka, Makkinka, Hargreavesa, Jensena-Haise'a) lub na podstawie danych meteorologicznych dla standardowej rośliny (np. wzory Penmana, Penmana-Monteitha), a także może być mierzona (np. parowanie z powierzchni wody, ewapotranspiracja standardowej pokrywy roślinnej o ściśle zdefiniowanych parametrach w ściśle określonych warunkach wzrostu).

W ostatnich latach najszerzej stosowaną i zalecaną przez FAO i ICID metodą określania ewapotranspiracji wskaźnikowej jest metoda Penmana-Monteitha [ALLEN i in. 1998; ŁABĘDZKI 2006; ŁABĘDZKI i in. 2008; 2011], która określa ewapotranspirację rośliny wskaźnikowej, tj. trawy o stałej, jednakowej wysokości równej 12 cm, stałej oporności stomatycznej równej  $70 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$ , stałym albedo wynoszącym 0,23, w pełni zakrywającej glebę, w warunkach aktywnego rozwoju i nieograniczonej dostępności wody.

Celem pracy jest określenie wartości i zmienności ewapotranspiracji wskaźnikowej, liczonej metodą Penmana-Monteitha w różnych rejonach Polski w poszczególnych miesiącach okresu wegetacyjnego w latach 1970–2004.

## METODA I MATERIAŁ BADAŃ

W pracy zastosowano metodę obliczania ewapotranspiracji wskaźnikowej, podaną przez ALLENA i in. [1998]. Dotyczy to wzoru podstawowego, jak również pozostałych procedur obliczania składników tego wzoru, podanych poniżej.

Ewapotranspiracja wskaźnikowa została obliczona wg wzoru:

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n) + \gamma \frac{900}{T + 273} u(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u)} \quad (1)$$

gdzie:

- $ET_o$  – ewapotranspiracja wskaźnikowa,  $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ;
- $R_n$  – promieniowanie netto,  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ;
- $T$  – temperatura powietrza,  $^{\circ}\text{C}$ ;
- $u$  – prędkość wiatru,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;

- $\Delta$  – nachylenie krzywej ciśnienia nasyconej pary wodnej,  $\text{kPa}\cdot\text{°C}^{-1}$ ;  
 $\gamma$  – stała psychrometryczna,  $\text{kPa}\cdot\text{°C}^{-1}$ ;  
 $e_a$  – ciśnienie pary wodnej,  $\text{kPa}$ ;  
 $e_s$  – ciśnienie pary wodnej nasyconej,  $\text{kPa}$ .

Promieniowanie netto  $R_n$  jest różnicą między dochodzącym promieniowaniem krótkofalowym netto  $R_{ns}$  i długofalowym promieniowaniem netto  $R_{nl}$ :

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (2)$$

Promieniowanie krótkofalowe netto  $R_{ns}$  obliczono na podstawie wzoru:

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad (3)$$

gdzie:

- $R_{ns}$  – promieniowanie krótkofalowe netto,  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ;  
 $\alpha$  – albedo równe 0,23 dla hipotetycznej rośliny wskaźnikowej, którą jest trawa, bez miana;  
 $R_s$  – dochodzące promieniowania słoneczne,  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ .

Dochodzące promieniowanie słoneczne  $R_s$  nie było mierzone i obliczono je zgodnie z równaniem:

$$R_s = \left( 0,25 + 0,50 \frac{S}{S_o} \right) R_a \quad (4)$$

gdzie:

- $S$  – usłonecznienie,  $\text{h}$ ;  
 $S_o$  – usłonecznienie możliwe,  $\text{h}$ ;  
 $R_a$  – promieniowanie słoneczne na górnej granicy atmosfery,  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ .

Promieniowanie słoneczne na górnej granicy atmosfery  $R_a$  i usłonecznienie możliwe  $S_o$  zostały określone na dany dzień i dla danej szerokości geograficznej na podstawie „Tablic słonecznych” [IMGW 1974].

Promieniowanie długofalowe netto obliczono wg równania:

$$R_{nl} = \sigma T^4 \left( 0,34 - 0,14 \sqrt{e_a} \right) \left( 1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (5)$$

gdzie:

- $R_{nl}$  – promieniowanie długofalowe netto,  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ;  
 $\sigma$  – stała Stefana-Boltzmana równa  $4,903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ}\cdot\text{K}^{-4}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ;

$T$  – temperatura powietrza, K;

$R_{so}$  – promieniowanie w warunkach bezchmurnego nieba,  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ , obliczone jako:

$$R_{so} = 0,75R_a \quad (6)$$

Ciśnienie pary wodnej nasyconej obliczono z zależności:

$$e_s = 0,611 \exp\left(\frac{17,27T}{T + 237,3}\right) \quad (7)$$

gdzie:

$e_s$  – ciśnienie pary wodnej nasyconej, kPa;

$T$  – temperatura powietrza, °C.

Aktualne ciśnienie pary wodnej obliczono wg zależności:

$$e_a = e_s \frac{RH}{100} \quad (8)$$

gdzie:

$e_a$  – aktualne ciśnienie pary wodnej, kPa;

$RH$  – wilgotność względna powietrza, %.

Nachylenie krzywej ciśnienia pary wodnej nasyconej w zależności od temperatury powietrza wyznaczono z zależności:

$$\Delta = \frac{4098e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (9)$$

gdzie:

$\Delta$  – nachylenie krzywej ciśnienia pary wodnej nasyconej,  $\text{kPa}\cdot\text{°C}^{-1}$ ;

$T$  – temperatura powietrza, °C.

Ewapotranspirację wskaźnikową obliczono w miesiącach okresu wegetacyjnego (kwiecień–wrzesień) w latach 1970–2004 na podstawie elementów meteorologicznych pomierzonych na wybranych trzech stacjach meteorologicznych IMGW z obszaru Polski. Są to: Kraków, Olsztyn i Poznań. Stacje te reprezentują regiony agroklimatyczne, wyznaczone na podstawie wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej przez ŁĄBĘDZKIEGO i in. [2011]. Kraków znajduje się w regionie, charakteryzującym się średnią wartością ewapotranspiracji wskaźnikowej w okresie wegetacyjnym, Olsztyn – małą, a Poznań – dużą.

Obliczenia wykonano dla okresów dekad kalendarzowych, wstawiając do wzorów (1)–(9) średnie dekadowe wartości odpowiednich elementów meteorologicznych. Średnie wartości dekadowe ewapotranspiracji wskaźnikowej uzyskane ze wzoru (1) mnożono przez 10 lub 11, uzyskując sumy ewapotranspiracji wskaźnikowej w dekadach, a sumując te wartości – sumy miesięczne i w całym okresie wegetacyjnym.

## WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Średnie w wieloleciu 1970–2004 sumy ewapotranspiracji wskaźnikowej, zarówno w poszczególnych miesiącach okresu wegetacyjnego, jak i w całym okresie, były największe w Poznaniu, a najmniejsze w Olsztynie. W Krakowie stwierdzono pośrednie wartości tego parametru agrometeorologicznego.

Sumaryczna ewapotranspiracja wskaźnikowa w okresie wegetacyjnym (kwiecień–wrzesień) wynosiła średnio w latach 1970–2004 od 469 mm w Olsztynie do 549 mm w Poznaniu (tab. 1). Maksymalna ewapotranspiracja wystąpiła w Poznaniu w 1982 r. (732 mm), a minimalna w Olsztynie w 1987 r. (375 mm) – rysunek 1. W 1982 r. wystąpiła susza na obszarze Polski, która charakteryzowała się ekstremalnym nasileniem w rejonie Wielkopolski. Rok 1987 był z kolei rokiem chłodnym i wilgotnym.

**Tabela 1.** Parametry statystyczne (mm) ewapotranspiracji wskaźnikowej według metody Penman-Monteitha w miesiącach kwiecień–wrzesień w latach 1970–2004

**Table 1.** Statistics (mm) of reference evapotranspiration according to Penman-Monteith method in the months April-September in 1970–2004

Parametr Parameter	Miejscowość Location		
	Kraków	Olsztyn	Poznań
1	2	3	4
	Kwiecień April		
<i>s</i>	62	53	64
min	45	38	42
max	81	77	94
Me	61	51	62
<i>SD</i>	8	9	12
<i>V</i> (%)	13	17	19
	Maj May		
<i>s</i>	94	90	103
min	76	66	71
max	121	121	135
Me	95	90	105
<i>SD</i>	12	15	16
<i>V</i> (%)	13	16	16

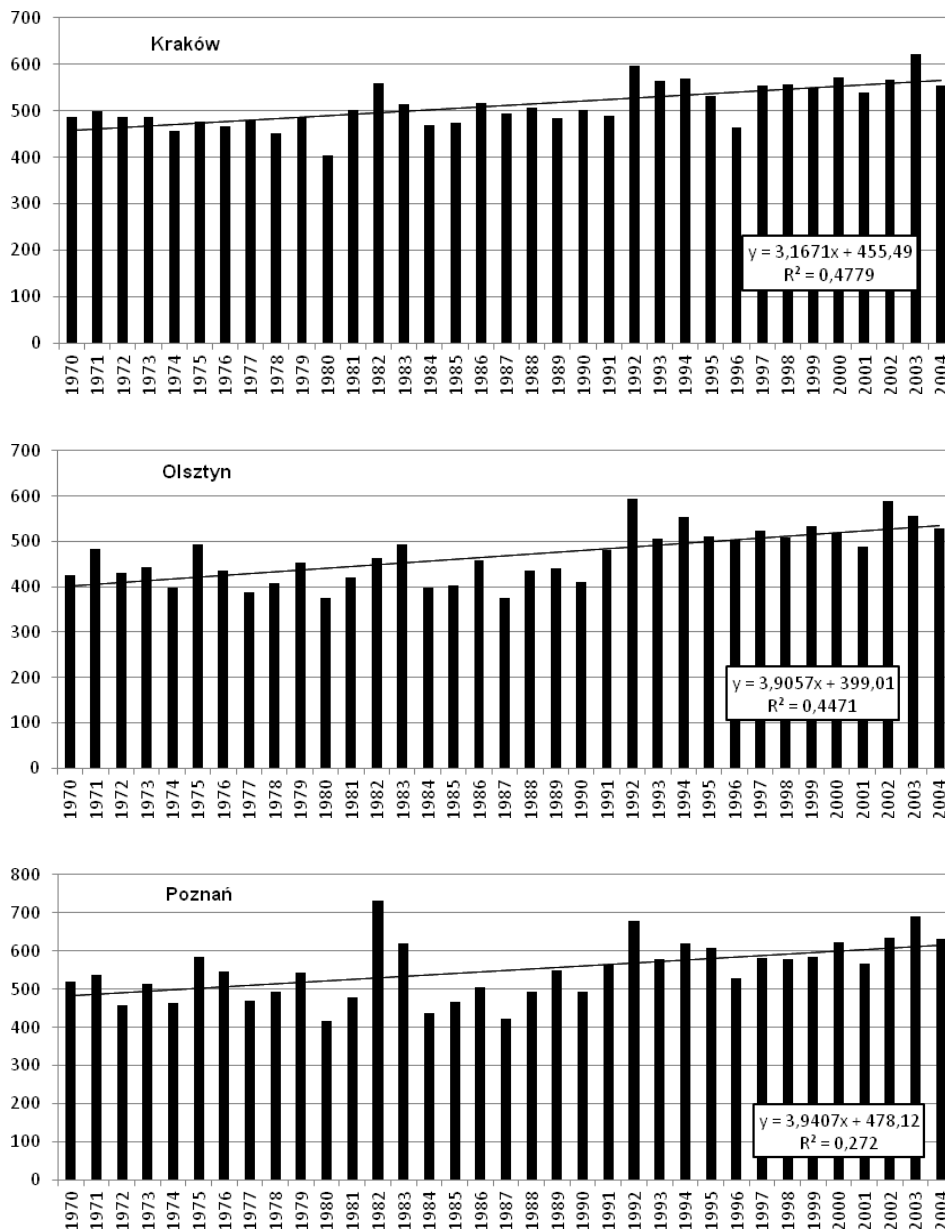
cd. tab. 1

1	2	3	4
	Czerwiec June		
<i>s</i>	103	95	109
min	80	71	77
max	135	140	161
Me	103	95	108
<i>SD</i>	13	16	23
<i>V</i> (%)	13	16	21
	Lipiec July		
<i>s</i>	108	100	116
min	77	68	72
max	141	155	172
Me	109	98	112
<i>SD</i>	13	19	25
<i>V</i> (%)	12	19	21
	Sierpień August		
<i>s</i>	91	86	101
min	51	63	71
max	126	114	159
Me	91	86	100
<i>SD</i>	15	15	19
<i>V</i> (%)	17	17	19
	Wrzesień September		
<i>s</i>	55	46	56
min	39	32	40
max	79	63	87
Me	54	43	51
<i>SD</i>	9	9	12
<i>V</i> (%)	16	19	21
	Suma w okresie kwiecień–wrzesień Sum in the period April–September		
<i>s</i>	512	469	549
min	405	375	416
max	622	594	732
Me	503	463	545
<i>SD</i>	47	60	77
<i>V</i> (%)	9	13	14

Objaśnienia: *s* – wartość średnia, min – wartość minimalna, max – wartość maksymalna, Me – mediana, *SD* – odchylenie standardowe, *V* – współczynnik zmienności.

Explanations: *s* – mean value, min – minimum value, max – maximum value, Me – mediana, *SD* – standard deviation, *V* – variability coefficient.

Źródło: wyniki własne. Source: own studies.



Rys. 1. Suma ewapotranspiracji wskaźnikowej (mm) według metody Penmana–Monteitha w okresie kwiecień-wrzesień w latach 1970–2004; źródło: wyniki własne

Fig. 1. Reference evapotranspiration sum (mm) according to Penman-Monteith method in the period April–September in 1970–2004; source: own studies

W poszczególnych miesiącach średnia wartość ewapotranspiracji wskaźnikowej w latach 1970–2004 wynosiła na trzech analizowanych stacjach od 50–60 mm w kwietniu i wrześniu do ok. 100 mm w pozostałych miesiącach umownego półrocza letniego (tab. 1). Największa ewapotranspiracja wskaźnikowa występuje w lipcu (od 100 mm w Olsztynie do 116 mm w Poznaniu). Maksymalna suma w tym miesiącu wyniosła 172 mm (średnio  $5,5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ) w Poznaniu i było to w suchym roku 1982. Była to jednocześnie największa ewapotranspiracja wskaźnikowa w całym wieloleciu we wszystkich miesiącach na wszystkich stacjach. Najmniejsza ewapotranspiracja wskaźnikowa wynosiła 32 mm (średnio  $1,1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ) i było to w Olsztynie we wrześniu 1978 r.

Relacja między wartością średnią i odchyleniem standardowym wskazuje na dużą zmienność ewapotranspiracji wskaźnikowej w kolejnych latach w okresach miesięcznych (współczynnik zmienności równy 12–21%) i umiarkowaną zmienność w okresie półrocza letniego (9–14%). Największą zmiennością charakteryzuje się ewapotranspiracja wskaźnikowa w Poznaniu, a najmniejszą w Krakowie, zarówno w poszczególnych miesiącach, jak i w całym okresie wegetacyjnym.

Wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej, obliczone stosowaną w pracy metodą, były weryfikowane w badaniach lizymetrycznych, prowadzonych w poprzednich latach. ŁABĘDZKI [1999] wykazał dużą zgodność między ewapotranspiracją obliczaną według wzoru (1) a pomierzoną w lizymetrach w rejonie Bydgoszczy, pokrytych trawą o standardowych parametrach, określonych w definicji ewapotranspiracji wskaźnikowej. Współczynnik korelacji liniowej  $r$  między wartościami pomierzonymi i obliczonymi wyniósł 0,997, a standardowy błąd oceny  $SEE = 0,45 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ . ALLEN i in. [1989; 1994; 2006], oceniając zgodność wyników obliczeń i pomiarów lizymetrycznych, uzyskali podobne wartości ( $r = 0,82\text{--}0,99$  i  $SEE = 0,09\text{--}0,77 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ). Zbliżone do przedstawionych w pracy średnie wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej, liczonej wzorem Penmana-Monteitha, uzyskał KUŹNIAR [2010] dla rejonu Krakowa (540 mm) w okresie od maja do października w latach 1990–2005.

Ewapotranspirację wskaźnikową określano dawniej jako ewapotranspirację potencjalną i liczone ją wzorem Penmana. Wartości uzyskiwane z użyciem wzoru Penmana są w warunkach Polski o ok. 10% większe od wartości obliczanych z zastosowaniem wzoru Penmana-Monteitha [ŁABĘDZKI 2006]. KĘDZIORA [1995] podaje, że w latach 1951–1970 w Wielkopolsce średnia suma ewapotranspiracji, liczonej wzorem Penmana, wyniosła 500 mm w okresie wegetacyjnym. W wieloleciu 1994–1996 średnia suma ewapotranspiracji potencjalnej w okresie wegetacyjnym dla Turwi w okolicy Poznania wyniosła natomiast 582 mm [KĘDZIORA, PALUSIŃSKI 1998]. Na Polesiu Lubelskim średnia suma ewapotranspiracji wskaźnikowej, liczonej wzorem Penmana, w okresie od 3 kwietnia do 9 października w latach 1974–1990 wyniosła 624 mm [SZAJDA 1997]. STEIDL i in. [2005] podają, że ewapotranspiracja potencjalna, liczonej wzorem Penmana, w okresie całego roku wynosi 580–610 mm w Wielkopolsce i dochodzi do 650 mm w zlewni środkowej i dol-



nej Odry. Przyjmując za KĘDZIORĄ [1995], że ewapotranspiracja potencjalna w półroczu zimowym (X–III) wynosi ok. 120 mm w środkowej Polsce, na półroczu letnie (IV–IX) przypada 460–490 mm z rocznej sumy obliczonej przez STEIDLA i in. [2005].

GAŚIOREK i in. [2008; 2009] podają znacznie mniejszą średnią wartość (285 mm) ewapotranspiracji wskaźnikowej, liczonej wzorem Penmana-Monteitha, w okresie kwiecień–wrzesień w wieloleciu 1945–2003 w rejonie Bydgoszczy, charakteryzującym się podobnymi warunkami klimatycznymi, co Poznań. Wydaje się to wartościami zaniżonymi.

Wartość ewapotranspiracji wskaźnikowej jest bardzo ważnym parametrem agrometeorologicznym, gdyż określa potencjalne możliwości parowania w danym regionie. Różnica między ewapotranspiracją wskaźnikową i opadem wskazuje na potencjalny niedobór lub nadmiar opadu, który jest z kolei istotnym parametrem w ocenie na przykład potrzeb nawadniania. W rejonie Poznania średni opad w wieloleciu 1970–2004 w okresie kwiecień–wrzesień wynosi 310 mm, czyli niedobór opadu w stosunku do ewapotranspiracji wskaźnikowej wynosi ok. 240 mm. Jest to region o najmniejszym opadzie w Polsce, zagrożony częstym występowaniem susz meteorologicznych i rolniczych [ŁABĘDZKI i in. 2008]. Zaniżając wartość ewapotranspiracji wskaźnikowej do poziomu 300 mm w regionie środkowej Polski, uzyskuje się równowagę opadu i potencjalnych możliwości parowania, czyli brak niedoboru opadu.

Sumy ewapotranspiracji wskaźnikowej w okresie wegetacyjnym w wieloleciu 1970–2004 wykazują istotny statystycznie i wzrostowy trend liniowy na wszystkich trzech analizowanych stacjach meteorologicznych (tab. 2, rys. 1). Świadczą o tym duże wartości współczynnika determinacji  $r^2$  oraz małe wartości prawdopodobieństwa  $p$ . Największy wzrost stwierdzono w kwietniu i maju oraz w całym okresie kwiecień–wrzesień. Nieistotny statystycznie trend ( $p > 0,05$ ) wystąpił we wrześniu w Krakowie oraz w czerwcu, lipcu i wrześniu w Poznaniu. Zwiększenie ewapotranspiracji wskaźnikowej jest spowodowane wzrostem temperatury powietrza i usłonecznienia [KĘDZIORA 2010; MAGER i in. 2009]. KĘDZIORA [2010] również wykazuje istotne zwiększenie zdolności ewaporacyjnej powietrza i parowania z powierzchni wody w Wielkopolsce w okresie 1996–2006.

## PODSUMOWANIE

Ewapotranspiracja wskaźnikowa jest miarą zdolności ewaporacyjnej powietrza i charakteryzuje meteorologiczne warunki procesu parowania. Jedną z wielu metod jej obliczania jest metoda Penmana-Monteitha. W okresie wegetacyjnym od kwietnia do września suma ewapotranspiracji wskaźnikowej, liczonej tą metodą, wynosi średnio 470 mm w rejonie Olsztyna, 510 mm w rejonie Krakowa i 550 mm w rejonie Poznania.

**Tabela 2.** Parametry statystyczne trendu liniowego ewapotranspiracji wskaźnikowej według metody Penmana-Monteitha w latach 1970–2004

**Table 2.** Statistics of a linear trend of reference evapotranspiration according to Penman-Monteith method in 1970–2004

Okres Period	Parametr Parameter	Miejscowość Location		
		Kraków	Olsztyn	Poznań
Kwiecień	$r^2$	0,321	0,536	0,484
April	$p$	0,0004	0,000006	0,000003
Maj	$r^2$	0,493	0,306	0,262
May	$p$	0,000003	0,0006	0,0017
Czerwiec	$r^2$	0,193	0,164	0,079
June	$p$	0,0083	0,0159	0,1028
Lipiec	$r^2$	0,187	0,189	0,066
July	$p$	0,0095	0,0090	0,1355
Sierpień	$r^2$	0,195	0,229	0,136
August	$p$	0,0078	0,0037	0,0292
Wrzesień	$r^2$	0,015	0,160	0,087
September	$p$	0,4791	0,0172	0,086
Kwiecień-wrzesień	$r^2$	0,478	0,447	0,27
April-September	$p$	0,000004	0,00001	0,0013

Objaśnienia:  $r^2$  – współczynnik determinacji,  $p$  – poziom prawdopodobieństwa.

Explanations:  $r^2$  – determination coefficient,  $p$  – probability level ( $p$ -value).

Źródło: wyniki własne. Source: own studies.

W poszczególnych miesiącach średnia ewapotranspiracja wskaźnikowa wynosi w tych rejonach Polski od 50–60 mm w kwietniu i wrześniu do 100–120 mm w pozostałych miesiącach okresu wegetacyjnego. Największa ewapotranspiracja wskaźnikowa występuje w lipcu. We wszystkich miesiącach największa ewapotranspiracja wskaźnikowa jest w Poznaniu, a najmniejsza w Olsztynie.

Ewapotranspiracja wskaźnikowa, liczona wzorem Penmana-Monteitha, wykazuje istotny i znaczny trend wzrostowy w latach 1970–2004 w trzech analizowanych rejonach, zarówno w większości miesięcy od kwietnia do września, jak i w całym tym okresie.

## LITERATURA

- ALLEN R.G., JENSEN M.E., WRIGHT J.L., BURMAN R.D. 1989. Operational estimate of reference evapotranspiration. *Agronomy Journal*. No. 81 s. 650–662.
- ALLEN R.G., PEREIRA L.S., RAES D., SMITH M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper. No. 56. ISBN 92-5-104219-5 ss. 300.

- ALLEN R.G., PRUITT W.O., WRIGHT J.L., HOWELL T.A., VENTURA F., SNYDER R., ITENFISU D., STEDUTO P., BERENGENA J., YRISARRY J.B., SMITH M., PEREIRA L.S., RAES D., PERRIER A., ALVES I., WALTER I., ELLIOTT R. 2006. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference  $ET_0$  by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management*. No. 81 s. 1–22.
- ALLEN R.G., SMITH M., PERRIER A., PEREIRA L.S. 1994. An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin*. Vol. 43. No. 2 s. 1–34.
- GĄSIOREK E., KAMIŃSKA J., MUSIAŁ E. 2008. Modelowanie ewapotranspiracji wskaźnikowej w różnych regionach Polski. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*. Nr 7 s. 69–80.
- GĄSIOREK E., KAMIŃSKA J., MUSIAŁ E. 2009. Porównanie metody Penmana i Penmana-Monteitha za pomocą rozkładów prawdopodobieństwa ewapotranspiracji wskaźnikowej. *Acta Agrophysica*. Nr 13(2) s. 341–351.
- IMGW 1974. *Tablice słoneczne*. Warszawa ss. 320.
- KĘDZIORA A. 2010. Zmiany klimatyczne i ich wpływ na warunki wodne krajobrazu rolniczego. W: *Klimatyczne zagrożenia rolnictwa w Polsce*. Pr. zbior. Red. C. Koźmiński, B. Michalska, J. Leśny. Szczecin. Wydaw. Nauk. U. Szczec. s. 103–136.
- KĘDZIORA A. 1995. *Podstawy agrometeorologii*. Warszawa. PWRiL. ISBN 83-09-01641-7 ss. 264.
- KĘDZIORA A., PALUSIŃSKI P. 1998. Warunki klimatyczne oraz zagrożenie gospodarki wodnej na terenie Parku Krajobrazowego im. Gen. D. Chłapowskiego. W: *Kształtowanie środowiska rolniczego na przykładzie Parku Krajobrazowego im. Gen. D. Chłapowskiego*. Pr. zbior. Red. L. Ryszkowski, S. Bałazy. Poznań. ZBSRiL PAN s. 19–40.
- KUŹNIAR A. 2010. Rozkład przestrzenny rolniczo-klimatycznego bilansu wodnego w dorzeczu górnej Wisły wyznaczonego z zastosowaniem metody Penmana-Monteitha (FAO-56). *Woda Środowisko Obszary Wiejskie. Rozprawy Naukowe i Monografie*. Nr 28. ISBN 978-83-62416-01-1 ss. 103.
- ŁABĘDZKI L. 1999. Przydatność wzoru Penmana-Monteitha do obliczania ewapotranspiracji wskaźnikowej i rzeczywistej użytków zielonych. *Wiadomości IMUZ*. T. 20. Z. 2 s. 89–101.
- ŁABĘDZKI L. 2006. Susze rolnicze – zarys problematyki oraz metody monitorowania i klasyfikacji. *Woda Środowisko Obszary Wiejskie. Rozprawy Naukowe i Monografie*. Nr 17. ISBN 83-88763-63-6 ss. 107.
- ŁABĘDZKI L., BĄK B., KANECKA-GESZKE E., KASPERSKA-WOŁOWICZ W., SMARZYŃSKA K. 2008. Związek między suszą meteorologiczną i rolniczą w różnych regionach agroklimatycznych Polski. *Woda Środowisko Obszary Wiejskie. Rozprawy Naukowe i Monografie*. Nr 25. ISBN 978-83-61875-03-1 ss. 137.
- ŁABĘDZKI L., KANECKA-GESZKE E., BĄK B., SŁOWIŃSKA S. 2011. Estimating reference evapotranspiration using the FAO Penman-Monteith method for climatic conditions of Poland. W: *Evapotranspiration*. Pr. zbior. Red. L. Łabędzki. Rijeka. InTech. s. 275–294.
- MAGER P., KASPROWICZ T., FARAT R. 2009. Change of air temperature and precipitation in Poland in 1966–2006. W: *Climate change and agriculture in Poland – impacts, mitigation and adaptation measures*. Pr. zbior. Red. J. Leśny. *Acta Agrophysica. Rozprawy i Monografie*. Nr 169 s. 19–38.
- STEIDL J., DANNOWSKI R., DEUMLICH D., KAJEWSKI I., KORNMILCH M., ŁABĘDZKI L., MIODUSZEWSKI W., TIPPL M., ZDANOWICZ A. 2005. Database: Spatial input data. W: *Nutrients and heavy metals in the Odra river system: emissions from point and diffuse sources, their loads and scenario calculations on possible changes*. Pr. zbior. Red. H. Behrendt, R. Dannowski. Berlin. Weißensee Verl. s. 21–41.
- SZAJDA J. 1997. Roślinne i glebowo-wodne wskaźniki ewapotranspiracji łąki na glebie torfowo-murszowej. *Rozprawy Habilitacyjne*. Falenty. Wydaw. IMUZ. ISBN 83-85735-62-3 ss. 62.

Leszek ŁABĘDZKI, Bogdan BĄK, Ewa KANECKA-GESZKE

**MAGNITUDE AND VARIABILITY  
OF PENMAN-MONTEITH REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION  
IN THE GROWING SEASON OF 1970–2004 IN SELECTED REGIONS OF POLAND**

**Key words:** *Penman-Monteith method, reference evapotranspiration*

**S u m m a r y**

Reference evapotranspiration is an important agrometeorological parameter describing the evaporative demand of the atmosphere. In relation to precipitation, it indicates the potential surplus or deficit of precipitation. The Penman-Monteith method has been considered as a universal standard to estimate reference evapotranspiration in recent years. In the paper reference evapotranspiration is calculated by Penman-Monteith method in the months of the growing season (April–September) in 1970–2004, using meteorological parameters measured at three stations in Poland: Kraków, Olsztyn and Poznań. The stations represent the agroclimatic regions with different temperature and precipitation characteristics.

Mean sums of reference evapotranspiration from April to September account 470 mm in Olsztyn, 510 mm in Kraków and 550 mm in Poznań. In particular months mean evapotranspiration accounts from 50–60 mm in April and September to 100–120 mm in other months of the growing period. The maximum evapotranspiration occurs in July. In all analyzed period the maximum evapotranspiration was in Poznań and the minimum in Olsztyn.

Reference evapotranspiration according to Penman-Monteith method had significant growth trend 1970–2004 in the three analyzed regions, both in most months and in the whole growing period.