INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH
INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS

Nr 7/2008, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 69–80
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi

Edward Gąsiorek, Joanna Kamińska, Elżbieta Musiał

MODELOWANIE EWAPOTRANSPIRACJI WSKAŹNIKOWEJ W RÓŻNYCH REGIONACH POLSKI

MODELLING OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION IN VARIOUS REGIONS OF POLAND

Streszczenie

Do końca lat 90. XX wieku metoda Penmana była powszechnie stosowaną metodą obliczania ewapotranspiracji wskaźnikowej. Prowadzone badania i weryfikacja metody Penmana skłoniły wielu badaczy do poszukiwania modyfikacji tego wzoru, ponieważ metoda Penmana dawała zawyżone wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej. Obecnie najpowszechniej stosowaną metodą wyznaczania ewapotranspiracji wskaźnikowej jest metoda Penmana-Monteitha. Metoda Penmana-Monteitha umożliwia dokładniejszą ocenę zdolności ewaporacyjnej atmosfery, dlatego jest metodą preferowaną np. przy obliczaniu klimatycznych bilansów wodnych, wskaźników suszy itp. W literaturze można spotkać wiele modyfikacji metody Penmana-Monteitha.

Autorzy prezentowanej pracy na przykładzie czterech zróżnicowanych regionów Polski pokazali, jak zmieniają się wartości parowania wskaźnikowego wraz ze zmianą metody wyznaczania tego wskaźnika.

Słowa kluczowe: ewapotranspiracja wskaźnikowa, rozkład gamma

Summary

Till the late 90-ties of the XXth century the Penman method has been used widely to evaluate the reference evapotranspiration. The ongoing research verified the Penman method and convinced many scientists to look for the modification of his formula, because the calculated values of reference evapotranspiration were too high. Nowadays, the method most frequently used is that of Penman-Monteith. It enables the more accurate evaluation of the atmospheric evaporation ability, therefore it is preferred for the calculation of climatic water balance or drought references. Many modifications of Penman-Monteith method can be found in literature.

The authors have analyzed the data from four various regions of Poland and have presented the differences in values of reference evapotranspiration depending on the method of calculation.

Key words: *reference evapotranspiration, gamma distribution*

WSTĘP

Ewapotranspiracja wskaźnikowa przyjmowana jest jako wielkość odniesienia i obliczana według praw fizyczno-matematycznych na podstawie danych meteorologicznych dla standardowej rośliny [wzór Penmana, Penmana-Monteitha], bądź na podstawie formuł empirycznych [np. wzór Baca, Turca, Matula, i innych], a także jako wielkość mierzona (parowanie z wolnej powierzchni wodnej lub ewapotranspiracja standardowej pokrywy roślinnej). Do końca lat 90. XX wieku zalecaną i powszechnie stosowaną metodą obliczania ewapotranspiracji wskaźnikowej był wzór Penmana, za granicą stosowany w modyfikacji FAO, natomiast w Polsce w modyfikacji francuskiej [Sarnacka i in. 1983] z wielkością promieniowania słonecznego obliczanego według Podogrockiego [1977].

Równanie Penmana opublikowane w 1948 roku [Penman 1948] było przełomem w modelowaniu procesu ewapotranspiracji. Ze wzoru Penmana obliczano parowanie z niskiej szaty roślinnej dobrze zaopatrzonej w wodę. Obecnie powszechnie stosowaną metodą wyznaczania ewapotranspiracji wskaźnikowej jest metoda Penmana-Monteitha. Allen i współautorzy [Allen i in. 1998] uważają, że metoda Penmana-Monteitha umożliwia dokładniejszą ocenę, możliwości wchłaniania pary wodnej przez warstwę atmosfery leżącą nad powierzchnią parującą. Powszechnie uważa się, że wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej obliczane za pomocą wzoru Penmana są zawyżone. Celem pracy jest porównanie różnych metod wyznaczania ewapotranspiracji wskaźnikowej w czterech regionach Polski.

METODYKA

Pierwszym etapem badań jest wyznaczenie ewapotranspiracji wskaźnikowej za pomocą metody Penmana. W metodzie tej zakłada się, że wartości wyznaczone za pomocą wzoru Penmana odpowiadają ewapotranspiracji z niskiej szaty roślinnej dobrze zaopatrzonej w wodę. Wg wzoru Penmana wartość ewapotranspiracji wskaźnikowej wyraża się następującym wzorem:

$$ET_0 = \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \quad \frac{\Delta}{\gamma}(R_n + G) + E_a \quad = \frac{\frac{\Delta}{\gamma}(R_n + G) + E_a}{1 + \frac{\Delta}{\gamma}} \frac{n}{28{,}34} \tag{1}$$

gdzie:

R_n – promieniowanie netto [Wm^{-2}];
G – ciepło odprowadzone do gleby [Wm^{-2}];
E_a – zdolność ewaporacyjna powietrza [Wm^{-2}];
Δ – nachylenie krzywej opisującej ciśnienie nasyconej pary wodnej jako funkcję temperatury, hPa K^{-1};
γ – stała psychrometryczna równa 0,655 hPa K^{-1} *;*
n – liczba dni w okresie, dla którego wykonywano obliczenia (dekada, miesiąc).

Drugi etap badań, to wyznaczenie wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej metodą Penmana- Monteitha. Monteith [1973] wprowadził do wzoru Penmana (1) opór, jaki stawia szata roślinna parze wodnej wędrującej z gleby do atmosfery. Opór ten łączy następujące opory: opór gleby(opór przy przepływie wody z gleby do otoczenia korzenia), opór korzeniowy (opór przy wnikaniu wody do korzeni), opór naczyniowy (opór przepływu wody w wiązce naczyniowej), opór liściowy (opór przepływu wody w tkankach liścia), opór szparkowy (opór przejścia pary wodnej z wnętrza liścia do atmosfery) i nazwał ten opór oporem sklepienia szaty roślinnej r_c.

W pracy przyjmuje się, że opór sklepienia szaty roślinnej jest wartością stałą dla wszystkich upraw polowych i wynosi 40sm^{-1} [Oke 1978, Musiał 2001] oraz, że opór aerodynamiczny wynosi 30sm^{-1} [Oke 1978, Musiał 2001] .

Wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej wyznacza się ze wzoru:

$$ET_o = \frac{\frac{\Delta}{\gamma}\cdot(R_n + G) + \rho \cdot c_p \cdot d / \gamma \cdot r_a}{\left(1+\frac{\Delta}{\gamma}\right)\left(1+\frac{r_c}{r_a}\right)} \cdot \frac{n}{28{,}34} \tag{2}$$

Metoda ta w prezentowanej pracy nazywana jest dalej jako Monteith I.

W metodzie Monteith II i Monteith III przyjęto za [Allen i inni 1994a, 1994b], że ewapotranspiracja wskaźnikowa 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 i stałej oporności stomatycznej równej 70 sm^{-1}. Opór aerodynamiczny r_a zwany inaczej oporem dyfuzji turbulencyjnej definiuje się jako opór w obszarze ograniczonym poziomem $z=d+z_0$ oraz poziomem w atmosferze na wysokości pomiarowej x.

$$r_a = \int_{d+z_o}^{x} \frac{dz}{K_m} \tag{3}$$

$$K_M = \frac{k^2 v(z-d)}{\ln \frac{x-d}{z_h}} \tag{4}$$

gdzie:

x – wysokość pomiarowa [m],
z – wysokość zmienna [m],
r_a – opór aerodynamiczny [sm^{-1}],
k – stała von Karmana = 0,41 [-],
v – prędkość wiatru na wysokości z [ms^{-1}],
z_o – parametr szorstkości przy transporcie ciepła i pary wodnej [m],
z_h – parametr szorstkości przy przekazywaniu pędu (wymianie pędu) [m],
d – warstwa przesunięcia płaszczyzny zerowej [m].

$$r_a = \ln \frac{x-d}{z_h} \int_{d+z_0}^{x} \frac{dz}{k^2 vz - k^2 vd} = \ln\left(\frac{x-d}{z_h}\right) \frac{1}{k^2 v} \int_{d+z_o}^{x} \frac{k^2 v}{k^2 vz - k^2 vd} dz = \frac{\ln \frac{x-d}{z_h} \ln \frac{x-d}{z_o}}{k^2 v} \tag{5}$$

Przy obliczeniach oporu aerodynamicznego dla hipotetycznej rośliny, jaką jest trawa o stałej wysokości *h* równej 12 cm uwzględniono następujące warunki:

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

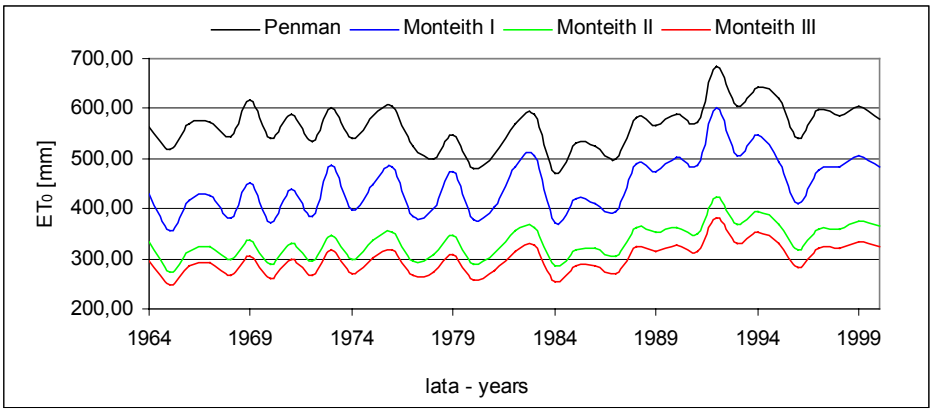
Uwzględnienie wymienionych zależności pozwala wyznaczyć wartość oporu aerodynamicznego $r_a = \frac{208}{v}$, który jest funkcją zmiennej prędkości wiatru mierzonej na wysokości 2 m.

W metodzie Monteith II pomija się strumień ciepła glebowego, gdyż w warunkach zdefiniowanych jako standardowe ma on niewielki udział w bilansie cieplnym runi trawiastej [Roguski i in. 2002]. Metoda Monteith III uwzględnia w bilansie cieplnym runi trawiastej także strumień ciepła glebowego.

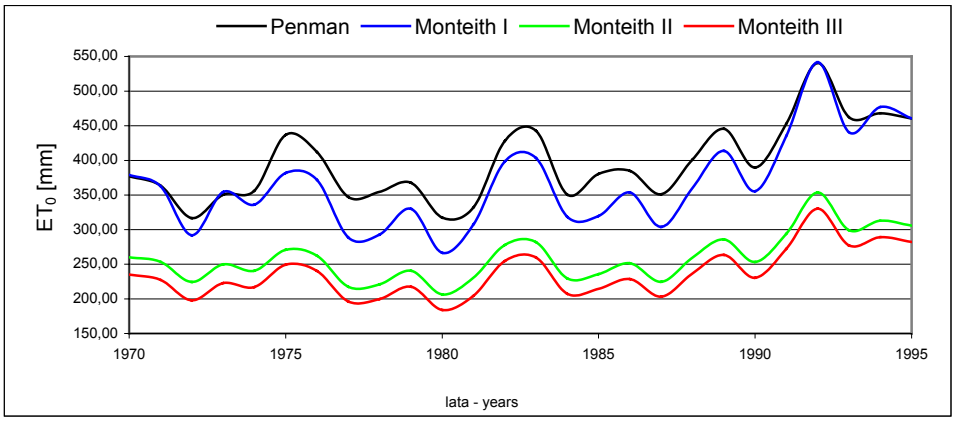
WYNIKI BADAŃ

Do badań wykorzystano dane pochodzące z czterech stacji doświadczalnych Bydgoszcz (1945–2003), Gorzów Wielkopolski (1970–1995), Łódź (1954–1995) oraz Wrocław (1964–2000).

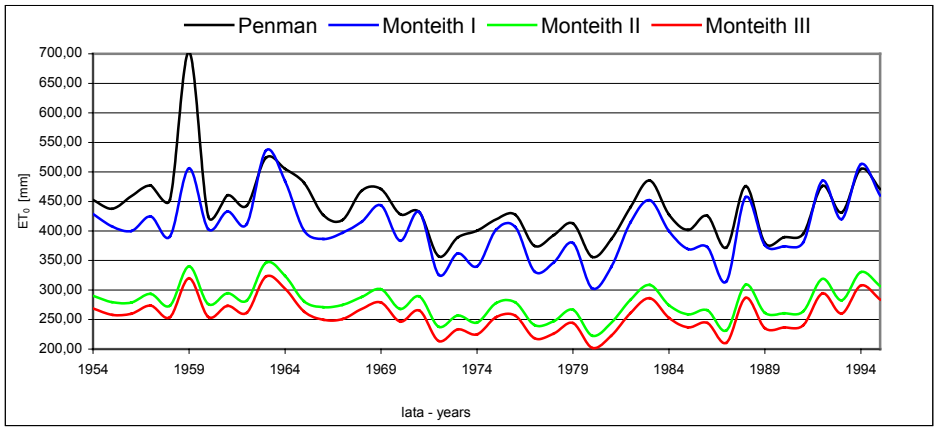
Do prezentacji graficznej wybrano wyznaczone metodą Penmana i Penmana-Monteitha wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej w modyfikacji Monteith I, II, III dla stacji Wrocław–Swojec, Gorzów i Łódź.



Rysunek 1. Ewapotranspiracja wskaźnikowa w okresie wegetacyjnym (IV–IX) w wieloleciu 1964–2000 na stacji Wrocław-Swojec
Figure 1. Reference evapotranspiration in the growing season (IV–IX) in the years 1964–2000 at the Wrocław-Swojec observatory



Rysunek 2. Ewapotranspiracja wskaźnikowa w okresie wegetacyjnym (IV–IX) w wieloleciu 1970–1995 na stacji Gorzów
Figure 2. Reference evapotranspiration in the growing season (IV–IX) in the period 1970–1995 at the Gorzów observatory



Rysunek 3. Ewapotranspiracja wskaźnikowa w okresie wegetacyjnym (IV–IX) w wieloleciu 1954–1995 na stacji Łódź

Figure 3. Reference evapotranspiration in the growing season (IV–IX) in the period 1954–1995 at the Łódź observatory

Analiza przedstawionych wykresów pozwala wyciągnąć następujące wnioski: wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej wyznaczone metodą Penmana znacznie przewyższają wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej wyznaczone metodami Monteith I, II i III. Zdecydowanie najmniejsze wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej otrzymano stosując metodę Monteith II zalecaną przez FAO i ICID i powszechnie stosowaną na świecie od 1990 roku [Allen i in. 1994, 1998; Feddes, Lensellink 1994; Smith, 1992].

Następnie do sumy ewapotranspiracji wskaźnikowej w okresie wegetacyjnym wg Penmana, Monteitha I, II i III dopasowano funkcję rozkładu prawdopodobieństwa. Przy dopasowywaniu funkcji rozkładu prawdopodobieństwa wykorzystano rozkład gamma. Zmienna losowa X podlega rozkładowi gamma o parametrach α, β>0, jeżeli jej gęstość prawdopodobieństwa jest określona wzorem:

$$f(x)=\begin{cases}\dfrac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)}x^{\alpha-1}\exp(-\dfrac{x}{\beta}) & dla \quad x>0\\ 0 \quad dla \quad x \quad \le 0\end{cases}$$

przy czym β jest parametrem skali, natomiast α parametrem kształtu.

Weryfikację hipotezy o zgodności rozkładów empirycznych z rozkładem gamma przeprowadzono za pomocą testu zgodności χ^2 – Pearsona.

Tabela 1. Weryfikacja hipotezy o zgodności rozkładu gamma z rozkładem empirycznym dla sumy ewapotranspiracji wskaźnikowej w okresie wegetacyjnym wyznaczonej metodami: Monteith I, Monteith II i Monteith III
Table 1. Verification of the hypothesis on consistency of gamma distribution to empirical distribution in case of reference evapotranspiration using Monteith I, Monteith II i Monteith III methods

stacja observatory	wielolecie perennial	Monteith I		Monteith II		Monteith III	
		χ_{obl}^2	p	χ_{obl}^2	p	χ_{obl}^2	p
Wrocław-Swojec	1964-2000	4,32	0,12	3,5	0,17	3,86	0,14
Bydgoszcz	1945-2003	6,24	0,18	6,37	0,17	3,05	0,22
Łódź	1954-1995	0,91	0,82	1,67	0,64	2,34	0,51
Gorzów	1970-1995	0,91	0,34	0,49	0,49	1,85	0,17

gdzie χ_{obl}^2 jest wartością statystyki χ^2, natomiast p jest najniższym poziomem istotności α, przy którym hipoteza zerowa mogłaby być odrzucona przy otrzymanej wartości statystyki χ^2.

Następnie wyznaczono parametry skali i kształtu rozkładu gamma oraz wyznaczono kwantyle rzędu 0,2, 0,5 i 0,8 oznaczone odpowiednio przez $x_{0,2}$, $x_{0,5}$ i $x_{0,8}$ tego rozkładu, przyjmując następującą klasyfikację: okres wegetacyjny w danym roku uważa się za mokry, jeżeli suma ewapotranspiracji wskaźnikowej w tym okresie nie przkracza $x_{0,2}$, za średni jeżeli suma ewapotranspiracji w okresie wegetacyjnym jest większa niż $x_{0,2}$ lecz nie przekracza $x_{0,5}$, za suchy jeżeli suma ewapotranspiracji w okresie wegetacyjnym jest większa niż $x_{0,5}$ lecz nie przekracza $x_{0,8}$ i za bardzo suchy jeżeli suma ewapotranspiracji w okresie wegetacyjnym jest większa niż $x_{0,8}$. W tabelach 2, 3, 4 i 5 zostały wyznaczone wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej klasyfikujące okresy wegetacyjne jako mokre, średnie, suche i bardzo suche dla czterech stacji badawczych.

Tabela 2. Parametry skali i kształtu rozkładu gamma dla stacji Wrocław-Swojec (1964–2000)
Table 2. Parameters of scale and shape for gamma distribution at the Wrocław-Swojec observatory (1964–2000)

ewapotranspiracja wskaźnikowa reference evapotranspiration	rozkład Γ Γ distribution		kwantyl quantile		
	parametr parameter		$P(X<x_{0,2})=0,2$	$P(X<x_{0,5})=0,5$	$P(X<x_{0,8})=0,8$
	skali-β scale-β	kształtu – α shape – α			
Monteith I	6,66	67,21	401	445	493
Monteith II	2,97	100,93	274	299	325
Monteith III	3,24	103,38	307	334	362

Tabela 3. Parametry skali i kształtu rozkładu gamma dla stacji Bydgoszcz (1945–2003)
Table 3. Parameters of scale and shape for gamma distribution at the Bydgoszcz observatory (1945–2003)

ewapotranspiracja wskaźnikowa reference evapotranspiration	rozkład Γ Γ distribution		kwantyl quantile		
	parametr parameter		$P(X<x_{0,2})=0,2$	$P(X<x_{0,5})=0,5$	$P(X<x_{0,8})=0,8$
	skali –β scale – β	kształtu – α shape – α			
Monteith I	5,82	77,21	406	447	492
Monteith II	1,73	147,79	238	255	273
Monteith III	1,49	191,75	268	285	303

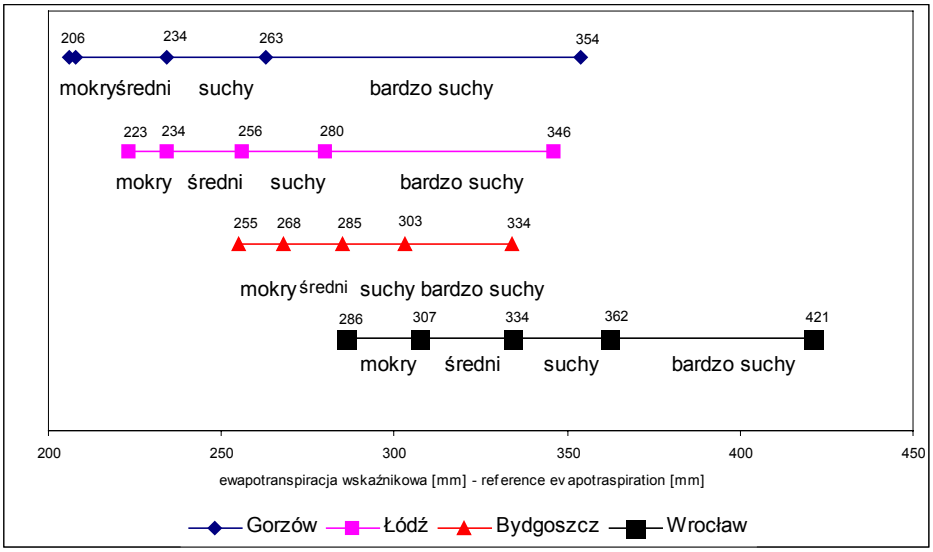
Tabela 4. Parametry skali i kształtu rozkładu gamma dla stacji Łódź (1954–1995)
Table 4. Parameters of scale and shape for gamma distribution at the Łódź observatory (1954–1995)

ewapotranspiracja wskaźnikowa reference evapotranspiration	rozkład Γ Γ distribution		kwantyl quantile		
	parametr parameter		$P(X<x_{0,2})=0,2$	$P(X<x_{0,5})=0,5$	$P(X<x_{0,8})=0,8$
	skali – β scale – β	kształtu – α shape – α			
Monteith I	6,66	60,84	361	403	448
Monteith II	2,96	86,98	234	256	280
Monteith III	2,74	101,83	256	278	302

Tabela 5. Parametry skali i kształtu rozkładu gamma dla stacji Gorzów (1970–1995)
Table 5. Parameters of scale and shape for gamma distribution at the Gorzów observatory (1970–1995)

ewapotranspiracja wskaźnikowa reference evapotranspiration	rozkład Γ Γ distribution		kwantyl quantile		
	parametr parameter		$P(X<x_{0,2})=0,2$	$P(X<x_{0,5})=0,5$	$P(X<x_{0,8})=0,8$
	skali – β scale –β	kształtu – α shape – α			
Monteith I	10,8	34,0	313	364	419
Monteith II	4,66	50,65	208	234	263
Monteith III	4,25	61,10	231	258	287

Ponieważ najbardziej preferowaną metodą wyznaczania ewaportanspiracji wskaźnikowej jest metoda Penmana-Monteitha w modyfikacji Allena i współautorów [Allen i in. 1998] opisywana w prezentowanej pracy jako Monteith II, dlatego dalsza analiza jest przeprowadzona tylko dla tej metody. Wyniki dla wszystkich stacji badawczych dotyczące parowania wskaźnikowego wyznaczonego metodą Monteith II prezentowane w tabelach 2–5, są przedstawione na rysunku 4.



Rysunek 4. Okresy wegetacyjne: mokre, średnie, suche i bardzo suche wyznaczone na podstawie rozkładu gamma dla Gorzowa (1970–1995), Łodzi (1954–1995), Bydgoszczy (1945–2003) i Wrocławia-Swojca (1964–2000) za pomocą metody Monteith II
Figure 4. The growing seasons: wet, mean-wet, dry and very dry obtained using gamma distribution fit for Gorzów (1970–1995), Łódź (1954–1995), Bydgoszcz (1945–2003) i Wrocław-Swojec (1964–2000) using the Monteith II method

Wyznaczenie okresów wegetacyjnych mokrych, średnich, suchych i bardzo suchych we wszystkich stacjach metodą Monteith II zróżnicowało cztery regiony ze względu na ewapotranspirację wskaźnikową. W badanych wieloleciach możliwości wchłaniania pary wodnej przez warstwę atmosfery leżącą nad powierzchnia parującą są największe we Wrocławiu, a najmniejsze w Gorzowie.

Szczegółowa analiza okresów wegetacyjnych mokrych, średnich, suchych i bardzo suchych dla stacji Wrocław-Swojec w wieloleciu 1964–2000 jest przedstawiona w tabelach 6–9. W tabelach tych $KBW_{M\text{-}II}$ oznacza klimatyczny bilans wodny wyznaczony z zastosowaniem metody Monteitha II.

Tabela 6. Sezony wegetacyjne mokre we Wrocławiu-Swojcu w wieloleciu 1964–2000 we Wrocławiu-Swojcu

Table 6. The wet growing seasons at Wrocław-Swojec in the period 1964–2000

okres wegetacyjny the growing season	Monteith II [mm]	opad precip. [mm]	KBW_{P-M}	okres wegetacyjny the growing season	Monteith II [mm]	opad precip. [mm]	KBW_{P-M}
1965	275	476	201	1977	294	461	167
1968	297	442	146	1980	290	482	192
1970	290	401	111	1984	286	406	120
1972	296	439	143	1987	305	393	88

Tabela 7. Sezony wegetacyjne średnie we Wrocławiu-Swojcu w wieloleciu 1964–2000 we Wrocławiu-Swojcu

Table 7. The mean-wet growing seasons at Wrocław-Swojec in the period 1964–2000

okres wegetacyjny the growing season	Monteith II [mm]	opad precip. [mm]	KBW_{P-M}	okres wegetacyjny the growing season	Monteith II [mm]	opad precip. [mm]	KBW_{P-M}
1966	314	374	60	1981	312	455	144
1967	323	360	37	1985	319	447	129
1971	329	402	73	1986	322	536	214
1978	307	483	176	1996	316	377	61

Tabela 8. Sezony wegetacyjne suche we Wrocławiu-Swojcu w wieloleciu 1964–2000 we Wrocławiu-Swojcu

Table 8. The dry growing seasons at Wrocław-Swojec in the period 1964–2000

okres wegetacyjny the growing season	Monteith II [mm]	opad precip. [mm]	KBW_{P-M}	okres wegetacyjny the growing season	Monteith II [mm]	opad precip. [mm]	KBW_{P-M}
1964	335	417	82	1982	356	293	-62
1969	336	244	-92	1988	362	321	-41
1973	347	285	-61	1989	353	277	-77
1975	336	351	15	1991	351	282	-68
1976	352	347	-4	1997	361	516	156
1979	345	301	-44	1998	361	365	5

Tabela 9. Sezony wegetacyjne bardzo suche we Wrocławiu-Swojcu w wieloleciu 1964–2000 we Wrocławiu-Swojcu
Table 9. The very dry growing seasons at Wrocław-Swojec in the period 1964–2000

okres wegetacyjny the growing season	Monteith II [mm]	opad precip. [mm]	KBW_{P-M}	okres wegetacyjny the growing season	Monteith II [mm]	opad precip. [mm]	KBW_{P-M}
1983	363	322	-41	1994	394	296	-99
1990	362	278	-84	1995	370	425	55
1992	421	179	-242	1999	376	354	-22
1993	369	334	-34	2000	365	314	-51

Interpretacja wyników zawartych w tabelach od 6 do 9 skłania do następujacego wniosku: w okresie wegetacyjnym mokrym i średnio mokrym wartości klimatycznego bilansu wodnego są dodatnie co oznacza przewagę sum opadowych w tym okresie nad ewapotranspiracją wskaźnikową, natomiast okresy suche i bardzo suche charakteryzują się w większości ujemnym klimatycznym bilansem wodnym, co oznacza przewagę ewapotranspiracji wskaźnikowej nad opadem.

WNIOSKI KOŃCOWE

1. Rozkład sumy ewapotranspiracji wskaźnikowej w okresie wegetacyjnym można przybliżyć rozkładem gamma.
2. Podział okresu wegetacyjnego za pomocą rozkładu gamma na mokry, średni, suchy i bardzo suchy zróżnicował stacje badawcze pod względem możliwości wchłaniania pary wodnej przez warstwę atmosfery leżącą nad powierzchnią parującą.
3. Klimatyczny bilans wodny jest ujemny w okresach wegetacyjnych suchych i bardzo suchych, natomiast dodatni w okresach mokrych i średnich.

BIBLIOGRAFIA

Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith M. *Crop evapotranspiration*. Guidelines for computing crop water requirements. Irrig. Drain. Paper no. 56. Rome 1998. FAO s.300.

Allen R. G., Smith M., Pereira L. S., Perrier A. *An update for the calculation of reference evapotranspiration*. ICID Bulletin vol. 43, nr 2, 1994a, s. 35–92.

Allen R. G., Smith M., Perrier A., Pereira L. S. *An update for the definition of reference evapotranspiration*. ICID Bulletin vol. 43, nr 2, 1994b, s. 1–34.

Feddes R. A., Lenselink K. J. *Evapotranspiration*. ILRI Publication 16. Drainage Principles and Applications. Wageningen, 1994, s. 145–173.

Kasperska-Wołowicz W., Łabędzki L. *Porównanie ewapotranspiracji wskaźnikowej według Penmana i Penmana-Monteitha w różnych regionach Polski*. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie, t. 4, z. 2a (11), 2004, s. 123–136.

Łabędzki L. *Przydatność wzoru Penmana-Monteitha do obliczania ewapotranspiracji wskaźnikowej i rzeczywistej użytków zielonych*. Wiadomości Instytutu Melioracji i Użytków Zielonych, T. XX, z. 2, 1999, s. 89–101.

Monteith J. *Principles of environmental physics*. American Elsevier Publ. Co., N.Y. 1973, s. 241.

Musiał E. *Modelowanie procesu ewapotranspiracji rzeczywistej i prognozowanie jego tendencji*. ZN AR we Wrocławiu nr 412, Rozprawy CLXXXII, 2001, ss.116.

Oke T. R., *Boundary layer climates*. Methuen & Co LTD, New York 1978.

Penman H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. London. Proc. Royal Soc. Vol. 193, 1948, s. 120–146.

Podogrocki J. *Zmienność czasowa promieniowania całkowitego w Polsce*. Zesz. Nauk. ART. w Olsztynie. Rolnictwo, Nr 21, 1977.

Roguski W., Łabędzki L., Kasperska W. *Analiza wybranych wzorów do obliczania parowania wskaźnikowego na potrzeby nawadniania użytków zielonych*. IMUZ, Falęty, t.2, z. 1 (4), 2002, s.197–209.

Sarnacka S., Brzeska J., Świerczyńska H. *Wybrane metody wyznaczania ewapotranspiracji potencjalnej*. Materiały Badawcze. IMGW, Warszawa 1983, s.35.

Smith M. *Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements*. Land and Water Development Division. Rome. FAO, 1992, s. 54.

Edward Gąsiorek, Joanna Kamińska, Elżbieta Musiał
Katedra Matematyki,
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
ul. Grunwaldzka 53, 50-357 Wrocław
e-mail: elzbieta.musial@up.wroc.pl

Recenzent: *Prof. dr hab. Włodzimierz Parzonka*