

*Sietan Chieng, Małgorzata Biniak-Pieróg, Joanna Kamińska, Wiesław Szulczewski,
Andrzej Żyromski*

**APLIKACJA EVAPO – NARZĘDZIE DO WYZNACZANIA
EWAPOTRANSPIRACJI METODĄ
FAO – PENMAN – MONTEITH**

***EVAPO APPLICATION – A TOOL FOR DETERMINING
EVAPOTRANSPIRATION
BY FAO – PENMAN – MONTEITH METHOD***

Streszczenie

W pracy zaprezentowano aplikację do wyznaczania wartości dobowych ewapotranspiracji wskaźnikowej (ET_0), rozumianej jako wielkość parowania z powierzchni trawnika w pełni rozwoju, rosnącego na glebie, która zapewni optymalne warunki wegetacji. Aplikacja ta umożliwia wyznaczenie wartości ET_0 dla dowolnego miejsca zadanego współrzędnymi geograficznymi oraz wysokością nad poziomem morza na podstawie dobowych wartości temperatury powietrza, niedosytu wilgotności względnej, prędkości wiatru oraz usłonecznienia względnego. W zbiorze danych wejściowych znajdują się również zmienne o wartościach tabelarycznych, takie jak stała psychrometryczna zależna od wysokości nad poziomem morza i ciśnienia atmosferycznego, maksymalna prężność pary wodnej oraz tangens kąta nachylenia krzywej ciśnienia nasyconej pary wodnej zależne od temperatury, promieniowanie na górnej granicy atmosfery zależne od kolejnego numeru dnia w roku, które w aplikacji są wyznaczone automatycznie na podstawie zadanych informacji geograficznych. Aplikacja umożliwia przeprowadzenie analizy zmienności wartości ewapotranspiracji w latach, jak również w poszczególnych miesiącach. Na podstawie 30-letniego ciągu danych meteorologicznych wyznaczono wartości ewapotranspiracji dla Vancouver oraz Wrocławia – Swojca i wykonano przykładową analizę z zastosowaniem aplikacji Evapo.

Słowa kluczowe: ewapotranspiracja wskaźnikowa, model Penmana-Monteith'a, aplikacja

Summary

The paper presents an application to calculate the daily reference evapotranspiration values (ET_0), understood as the amount of evaporation from the lawn surface fully developed, growing on the soil, which provides optimal growth conditions. The presented application allows to determine the ET_0 value for any location for given geographic coordinates and location above sea level on the basis of daily values of air temperature, saturation deficit, wind speed and relative sunshine. As the input data there are also variables such as psychometric constant dependent on the location above sea level and atmospheric pressure, the maximum vapor pressure and the slope vapor pressure deficit dependent on temperature, extraterrestrial radiation dependent on sequent day number of the year, which in Evapo application are determined automatically based on given geographical information. The application allows to analyze evapotranspiration variability during particular years and months. Basing on 30 years of meteorological data the values of evapotranspiration for the Vancouver and Wrocław – Swojec was calculated and exemplary analysis was performed using the presented application.

Key words: potential evapotranspiration, Penman – Monteith model, computer application

WSTĘP

Ewapotranspiracja, będąca sumą parowania z gleby oraz transpiracji roślin, jest skomplikowanym procesem nie tylko do bezpośredniego zmierzenia, ale także jest trudna do szacowania i modelowania. Wynika to z faktu, że jej wielkość uwarunkowana jest wieloma czynnikami tj. temperaturą i wilgotnością powietrza, prędkością wiatru, wilgotnością gleby oraz gatunkiem rośliny. Jej wielkość ocenić można pośrednio wykorzystując metodę bilansu cieplnego, bilansu wodnego gleby czy też bilansu wodnego zlewni rzecznej. Jednak najbardziej dokładniejszy obraz wielkości tego procesu dają pomiary bezpośrednie z zastosowaniem lizymetrów lub ewaporometrów glebowych [Bac , Rojek 1999]. Z uwagi na trudności pomiarowe, niewiele ośrodków prowadzi bezpośrednie badania ewapotranspiracji, stąd też niewielka jest ilość długich ciągów pomiarowych tego elementu agrometeorologicznego. Na podstawie badań terenowych powstało wiele modeli matematycznych, pozwalających obliczyć ewapotranspirację w oparciu o dane meteorologiczne z rozważanego obszaru. Szajda [2006] podjął się oceny ewapotranspiracji użytków zielonych na podstawie zmierzonego, obliczonego lub szacowanego plonu aktualnego. W większości jednak modele te nie są uniwersalnymi i wymagają kalibracji do warunków lokalnych [Hossein i _p. 2004]. Aktualnie za najbardziej adekwatny procesowi rzeczywistości uważa się model Penmana-Monteith'a. Model ten znalazł również zastosowanie do oceny ewapotranspiracji w warunkach klimatycznych Polski [Łabędzki i _p. 2011, Gąsiorok i _p. 2008]. Model ten jest dość skomplikowany

obliczeniowo, stąd też interesująca może być aplikacja, która umożliwia, na podstawie plików z danymi wejściowymi przygotowanymi w Excelu, wyznaczenie ewapotranspiracji oraz przeprowadzenie prostej analizy i zapisanie wyników w tym samym formacie. Algorytm obliczeń podał też Kowalik [2011].

METODYKA

Celem pracy jest przedstawienie autorskiej aplikacji Evapo, umożliwiającej obliczanie ewapotranspiracji rzeczywistej metodą Penmanna-Monteith'a wraz z podstawową analizą wyników, którą umożliwia ten program. Dla pokazania możliwości omawianej aplikacji zaprezentowane przykładowe jej zastosowanie do obliczania wielkości parowania dla miejscowości o różnym położeniu geograficznym wraz z podstawową analizą wyników.

Przedstawiona w pracy aplikacja została utworzona w środowisku Delphi. Pozwoliło to na import danych wejściowych z plików przygotowanych w standardowy sposób w Excelu tzn. w kolumnach kolejne lata, a w wierszach wartości w kolejnych dniach. Przykład temperatur maksymalnych dla Vancouver przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Przykładowy zestaw danych wejściowych do aplikacji Evapo
Table 1. Example of input data for Evapo application

Miesiąc Month	Dzień Day	1971	1972	1973
4	1	11,1	8,9	10,0
4	2	12,2	8,9	12,8
4	3	10,0	11,1	13,9
4	4	13,3	11,1	15,0
4	5	14,4	14,4	10,6
4	6	10,6	9,4	12,2
4	7	10,6	8,3	12,8

Źródło: opracowanie własne
Source: own study

Po wczytaniu każdego pliku z danymi, program umożliwia zapisanie tych danych w formacie przygotowanym na potrzeby opisywanej aplikacji. Tego typu zabieg powoduje zmniejszenie czasochłonności obliczeń w przypadku ich powtarzania. Podstawową funkcją aplikacji jest obliczenie ewapotranspiracji wskaźnikowej (ET_0) według metody omówionej poniżej, zapisanie otrzymanych wartości w pliku w formacie Excel oraz przeprowadzenie prostej analizy otrzymanych wyników. Format pliku wynikowego jest identyczny jak plików wejściowych przedstawiony w tabeli 1.

Do wyznaczania wartości dobowych ewapotranspiracji wskaźnikowej zastosowano zależność Penman'a-Monteith'a [Crop evapotranspiration – Guidelines for ... 1998]:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34)u_2} \quad (1)$$

gdzie:

- ET_0 – ewapotranspiracja [mm doba⁻¹],
- R_n – promieniowanie netto [MJ m⁻² doba⁻¹],
- G – strumień ciepła w glebie [MJ m⁻² doba⁻¹],
- T – średnia dobową temperatura powietrza na wysokości 2m [°C],
- u_2 – prędkość wiatru na wysokości 2 m [m s⁻¹],
- e_s – max prężność pary wodnej [pa],
- e_a – aktualna prężność pary wodnej [pa],
- Δ – tangens kąta nachylenia krzywej ciśnienia pary wodnej [pa °C⁻¹],
- γ – stała psychrometryczna [pa °C⁻¹].

Wartości temperatury oraz prędkości wiatru pochodzą z pomiarów meteorologicznych.

Przy wyznaczaniu dobowych wartości ewapotranspiracji ze względu na zerowy bilans dobowy, przyjęto strumień ciepła w glebie G równy zero.

Wprowadzono oznaczenie ciśnienia pary nasyconej $e^0(T)$ [pa] przy danej temperaturze T :

$$e^0(T) = 0.6108 \cdot e^{\left(\frac{17.27T}{T+273.3}\right)} \quad (2)$$

Tangens kąta nachylenia krzywej ciśnienia pary wodnej Δ [pa °C⁻¹] w funkcji temperatury T obliczono zgodnie z zależnością:

$$\Delta = \frac{4098e^0(T)}{(T + 237.3)^2} \quad (3)$$

Maksymalną prężność pary wodnej e_s wyznaczono jako średnią arytmetyczną z wartości ekstremalnych $e^0(T_{\max})$, $e^0(T_{\min})$:

$$e_s = \frac{e^0(T_{\max}) + e^0(T_{\min})}{2} \quad (4)$$

Aplikacja umożliwia wyznaczenie aktualnej prężności pary wodnej e_a dwoma sposobami:

$$1. \quad e_a = \frac{e^0(T_{\max}) \frac{RH_{\min}}{100} + e^0(T_{\min}) \frac{RH_{\max}}{100}}{2} \quad (5)$$

lub

$$2. \quad e_a = \left(\frac{RH_{\max} + RH_{\min}}{200} \right) \left(\frac{e^0(T_{\max}) + e^0(T_{\min})}{2} \right) \quad (6)$$

a następnie porównanie wartości ewapotranspiracji wyznaczonej z zastosowaniem każdej z opisanych wyżej sposobów.

Wartości stałej psychrometrycznej γ wyznaczono na podstawie zależności wyrażającej ją w funkcji ciśnienia atmosferycznego P zależnego od wysokości nad poziomem morza:

$$\gamma = 0.665P \cdot 10^{-3} = 0.665 \cdot 101.3 \cdot 10^{-3} \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad (7)$$

gdzie:

- P – ciśnienie atmosferyczne [pa],
- z – wysokość n.p.m [m].

Promieniowanie netto R_n jest różnicą pomiędzy dostarczanym do powierzchni promieniowaniem krótkofalowym R_{ns} , a wypromieniowanym długofalowym R_{nl} . Wyznaczenie tej wielkości jest procesem złożonym i czasochłonnym.

Na wstępie wyznaczono promieniowanie na górnej granicy atmosfery R_a [$\text{MJ m}^{-2} \text{doba}^{-1}$], korzystając z zależności:

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (8)$$

gdzie:

- G_{sc} – stała słoneczna = $0.0820 \text{ [MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}]$,
- φ – długość geograficzna [rad]
- J – kolejny dzień w roku (uwzględniono lata przestępne),

$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right)$ – odwrotność względnej odległości pomiędzy

Ziemią i Słońcem,

$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right)$ – kąt deklinacji,

$\omega_s = \arccos(-\text{tg}(\varphi)\text{tg}(\delta))$ – wysokość katowa Słońca.

W kolejnym kroku wyznaczono promieniowanie słoneczne R_s [MJ m^{-2} dzień $^{-1}$]:

$$R_s = \left(0.25 + 0.5 \cdot \frac{n}{N}\right) R_a \quad (9)$$

gdzie:

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \text{ - usłonecznienie możliwe [godz.]},$$

n – usłonecznienie rzeczywiste [godz.].

Promieniowanie przy bezchmurnym niebie przyjęto w postaci

$$R_{s0} = 0.75 \cdot R_a. \quad (10)$$

Bilans promieniowania krótkofalowego R_{ns} [MJ m^{-2} doba $^{-1}$] został wyznaczony ze wzoru:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \cdot R_s, \quad (11)$$

Domyślnie w aplikacji przyjęto wartość albedo $\alpha=0.23$ dla trawnika w pełni rozwoju, jednak istnieje możliwość zmiany wartości tego parametru.

Wielkość wypromieniowywania długofalowego R_{nl} [MJ m^{-2} dzień $^{-1}$] obliczono na podstawie zależności:

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{(T_{\max K})^4 + (T_{\min K})^4}{2} \right] \left(0.34 - 0.14 \sqrt{e_a} \right) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{s0}} - 0.35 \right) \quad (12)$$

gdzie:

σ – stała Stefana-Boltzmann stała [$4.903 \cdot 10^{-9}$ MJ K $^{-4}$ m $^{-2}$ doba $^{-1}$],

$T_{\max K}$ temperatura maksymalna za dobę [$^{\circ}\text{K}$],

$T_{\min K}$ temperatura minimalna za dobę [$^{\circ}\text{K}$]

Promieniowanie netto R_n jest różnicą pomiędzy dostarczanym do powierzchni promieniowaniem krótkofalowym R_{ns} , a wypromieniowanym długofalowym R_{nl} . Stąd ostatecznie:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (13)$$

Obliczenie promieniowania netto kończy wyznaczanie wartości koniecznych do obliczenia ewapotranspiracji przy pomocy wzoru (1).

W przypadku danych z Wrocławia dysponowano prędkością wiatru zmierzoną na wysokości 10 m. W celu przeniesienia tych danych na konieczny do obliczeń pomiar z wysokości 2 m wykorzystano potęgowy wzór empiryczny

$$u_2 = u_{10} \left(\frac{2}{10} \right)^{\alpha} \text{ (Flaga 2008), gdzie } u_{10} \text{ to prędkość wiatru na wysokości 10 m,}$$

natomiast α jest parametrem szorstkości terenu, przyjętym dla Wrocławia na poziomie 0.14.

WYNIKI

W celu zaprezentowania możliwości aplikacji Evapo, zastosowano ją do obliczenia ewapotranspiracji dla dwóch miejscowości: Wrocław oraz Vancouver, wykorzystując w tym celu serie pomiarowe niezbędnych danych meteorologicznych pochodzących z okresu 1971÷2000. Wybrane miejscowości, choć położone są na zbliżonych szerokościach geograficznych (Wrocław – 51°07' N, Vancouver – 49°11' N), charakteryzują odmienne czynniki kształtujące klimat. Miasto Vancouver zlokalizowane jest na pacyficznym, zachodnim wybrzeżu Kanady w południowo zachodniej części kraju, sama zaś stacja meteorologiczna, z której pochodzą dane wykorzystane do obliczeń znajduje się w okolicach lotniska na wysokości 3,0 m n.p.m. Dane meteorologiczne przyjęte do obliczenia ewapotranspiracji dla Wrocławia pochodzą z pomiarów prowadzonych na terenie Obserwatorium Agro- i Hydrometeorologii należącego do Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Stacja ta zlokalizowana jest w południowo-wschodniej części miasta a od centrum oddzielona jest kompleksem parków, stadionów, kanałem Odra – Widawa oraz łąkami i polami. Obserwatorium zlokalizowane jest na wysokości 121 m n.p.m. Parametry meteorologiczne wykorzystane do obliczeń spełniały w obu przypadkach wymagania metodyczne za wyjątkiem wilgotności względnej powietrza oraz prędkości wiatru. Różnice polegały na tym, że wybór ekstremalnych wartości wilgotności powietrza z Vancouver był możliwy z 24 punktowych wartości godzinnych, natomiast w przypadku Wrocławia wybór możliwy był tylko z 4 terminów pomiarowych. Dodatkowym problemem dla Wrocławia była zmiana terminu pomiaru wilgotności z godziny 21 na godzinę 19 w latach 70-tych. Odnośnie prędkości wiatru w przypadku Vancouver wykorzystano rzeczywiste wartości z wysokości 2 metrów nad terenem, natomiast dla Wrocławia wartości te były ekstrapolowane.

W tabeli 2 zestawiono przykładowe charakterystyki klimatyczne dla uwzględnionych w pracy miast, pochodzące z wielolecia 1971÷2000. Zaprezentowane w tabeli 2 wyniki wskazują na bardzo zbliżone średnie miesięczne wartości temperatury powietrza w okresie wegetacyjnym. Analiza porównawcza obu ciągów tego elementu meteorologicznego wskazuje na niższe wartości o 1° w kwietniu i we wrześniu we Wrocławiu. Natomiast analiza rozkładu sum miesięcznych opadów atmosferycznych w okresie wegetacji (tab. 2) wskazuje na Vancouver jako typowego przedstawiciela klimatu morskiego, natomiast wysokie wartości tego czynnika w okresie letnim we Wrocławiu wskazują na rozkład charakterystyczny dla klimatu kontynentalnego. Analiza wartości sum miesięcznych usłonecznienia wskazuje na potencjalnie lepsze warunki pozyskiwania energii niezbędnej w procesie fotosyntezy w okresie wegetacji w Vancouver.

Miejscowość ta charakteryzuje się sumarycznie większym o 472 godziny usłonecznieniem w okresie wegetacyjnym w porównaniu do Wrocławia.

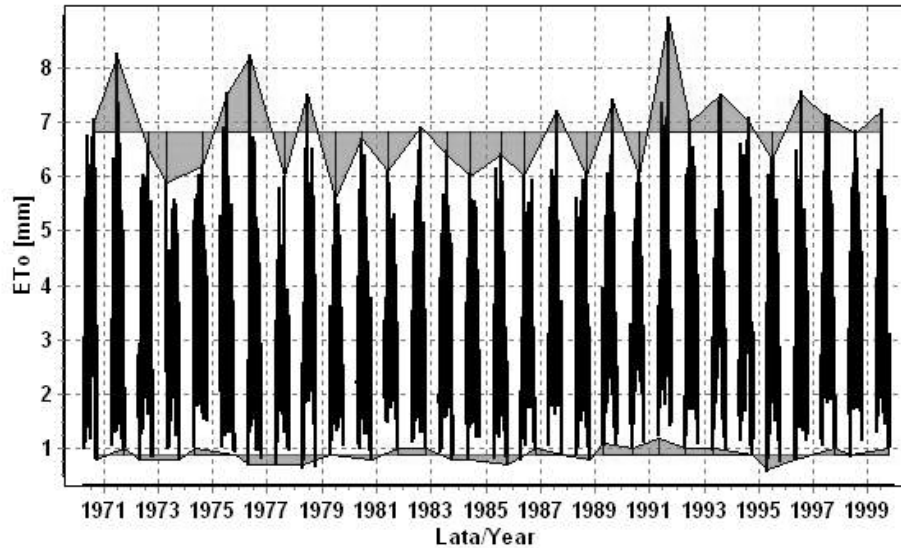
Tabela 2. Średnie wieloletnie wartości temperatury powietrza, opadów atmosferycznych oraz usłonecznienia dla Wrocławia i Vancouver z lat 1971÷2000

Table 2. Many-years average values of air temperature, precipitation and sunshine duration in Wrocław and Vancouver for years 1971÷2000

Parametr <i>Parameter</i>	Temperatura powietrza [°C] Air temperature [°C]						
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	IV-IX
<i>Miesiąc</i> Month							
Wrocław – Swojec	8,2	13,7	16,6	18,3	17,9	13,6	14,7
Vancouver	9,2	12,5	15,2	17,5	17,6	14,6	14,4
<i>Parametr/</i> <i>Parameter</i>	Opad atmosferyczny [mm] Precipitation [mm]						
	Precipitation [°C]						
<i>Miesiąc</i> Month							
Wrocław – Swojec	37,7	55,1	72,7	87,2	67,2	48,1	367,9
Vancouver	84,0	67,9	54,8	39,6	39,1	53,5	338,9
<i>Parametr</i> <i>Parameter</i>	Usłonecznienie [godz.] Sunshine duration [hours]						
	Sunshine duration [hours]						
<i>Miesiąc</i> Month							
Wrocław – Swojec	141,9	210,4	185,5	204,5	208,7	124,0	1075,1
Vancouver	179,8	230,7	229,1	294,5	267,9	201,6	1403,6

Źródło: opracowanie własne.
Source: own study

Na rys. 1 przedstawiono dobowe wartości ewapotranspiracji rzeczywistej z 30 lat z okresu wegetacyjnego (IV-IX) oraz maksymalne i minimalne jej wartości uzyskane w każdym roku przyjętym do analiz dla Wrocławia. Rysunek ten jest syntetycznym wynikiem zmienności parowania, zawierającym około 5400 dobowych informacji o tym parametrze. Na potrzeby publikacji rysunek ten jak i pozostałe zaprezentowane są w odcieniach szarości.



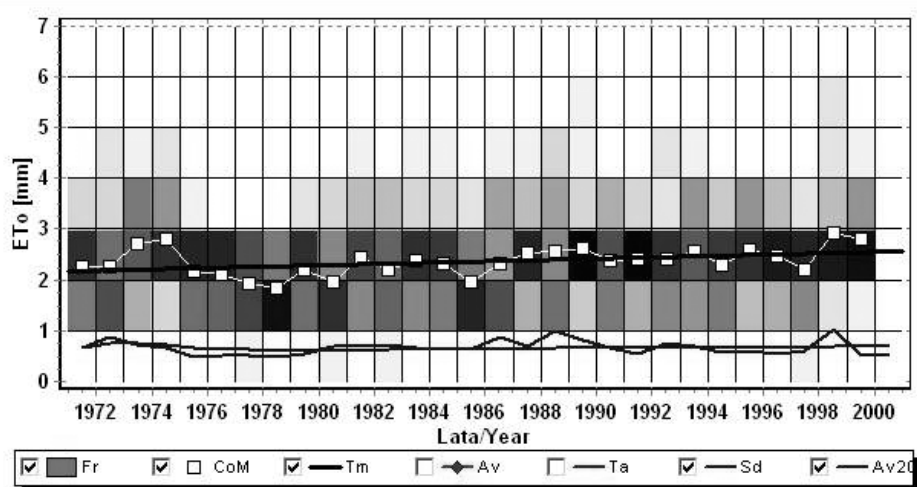
Rysunek 1. Wartości dobowe ewapotranspiracji wskaźnikowej E_{t_0} dla Wrocławia – Swojca w wieloleciu 1971÷2000. Źródło: opracowanie własne.

Figure 1. Daily evapotranspiration values E_{t_0} for Wrocław – Swojec during years 1971÷2000. Source: own study.

Opracowana aplikacja umożliwia wyznaczenie dla każdego z miesięcy okresu wegetacyjnego w formie graficznej ewapotranspiracji wskaźnikowej z analizą jego dziennej zmienności. Dla wybranego miesiąca z każdego roku wyznaczono częstość występowania dobowych wartości ewapotranspiracji w każdym z całkowitych przedziałów. Na podstawie tych częstości wyznaczono wartość przeciętną jako środek masy z powierzchnią równą częstości, a masą – środkowej wartości ewapotranspiracji w danym przedziale. Dodatkowo wyznaczono odchylenia standardowe wartości w miesiącu każdego roku i do wyłączenia ich wartości, w celu odczytania tendencji, obliczono i zaznaczono 20-letnie średnie kroczące. Jako przykład przedstawiono wykres dla miesiąca września (rys. 2.).

Analiza współczynników kierunkowych (rys. 3) dla okresów dziesięcioletnich wskazuje na ich zróżnicowanie. Charakterystyczne jest zróżnicowanie ich wartości dla obydwu miejscowości w lipcu i wrześniu. Z uzyskanych wartości oraz ich konfrontacji z wielkością usłonecznienia w tych dwóch miesiącach można zauważyć, że czynnik energetyczny nie jest dominującym. Również nie jest zauważalny potencjalny stan większego uwilgotnienia powietrza wynikający z bliskości oceanu. W Vancouver w lipcu usłonecznienie było wyższe o 90

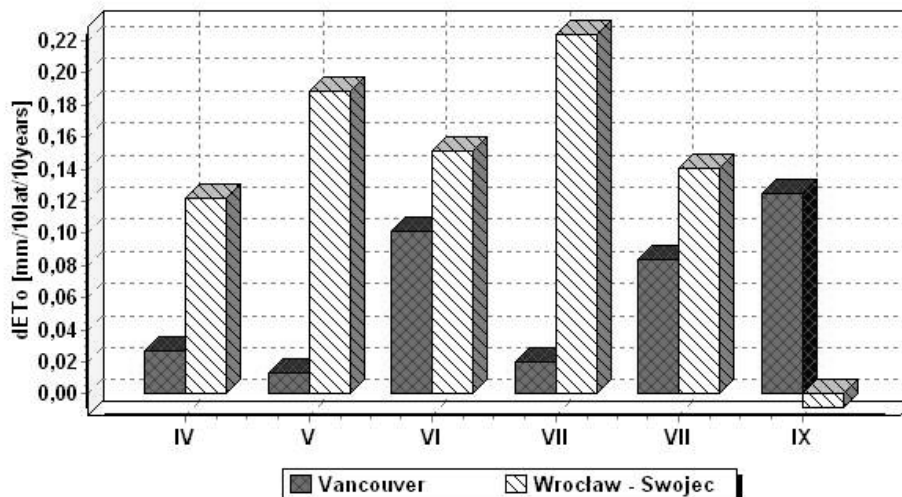
godzin w porównaniu do Wrocławia, a mimo to tendencja zmian ewapotranspiracji w tym miesiącu jest 10-cio krotnie niższa. Przypada to również na okres niższych o blisko połowę opadów atmosferycznych. Natomiast we wrześniu tendencja zmian ewapotranspiracji jest odwrotna. Jest to najprawdopodobniej podyktowane wyższą sumą opadów atmosferycznych i wyższą sumą usłonecznienia. Wskazuje to jednoznacznie na fakt, że w warunkach klimatycznych Vancouver te dwa czynniki łącznie odgrywają istotną rolę w dynamice zmian ewapotranspiracji.



Źródło: opracowanie własne.
Source: own study.

Rysunek 2. Wartości sum ewapotranspiracji wskaźnikowej Et_0 we wrześniu dla każdego roku z wielolecia 1971÷2000 ze średnimi, środkami mas oraz ich trendami dla Vancouver. Oznaczenia: Fr – częstość, CoM – środek masy, Tm – trend dla środka masy, Av – średnia, Ta – trend dla średniej, Sd – odchylenie standardowe, Av₂₀ – średnia krocząca (20)

Figure 2. The values of evapotranspiration sums Et_0 in September for each of the year from years 1971÷2000 with averages, centers of mass and their tendencies for Vancouver. Explanations: Fr – frequency, CoM – the center of mass, Tm – tendency for the center of mass, Av – average, Ta – tendency for average, Sd – standard deviation, Av₂₀ – moving average (20)



Źródło: opracowanie własne.
Source: own study.

Rysunek 3. Wartości współczynników kierunkowych prostych regresji miesięcznych wartości środków masy dEt_0 w wieloletniu 1971÷2000 dla Wrocławia – Swojca oraz Vancouver

Figure 3. The values of directional coefficients of regression lines of the centers of mass monthly values dEt_0 for years 1971÷2000 in Vancouver and Wrocław – Swojec

WNIOSKI

Wykonane na podstawie danych źródłowych obliczenia dla Vancouver i Wrocławia, z wykorzystaniem opracowanej aplikacji Evapo oraz przeprowadzone analizy uzyskanych wyników ewapotranspiracji i wykorzystywanych danych wejściowych pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Wyznaczanie wartości dobowych ewapotranspiracji wskaźnikowej z formuły Penman'a-Monteith'a jest procesem w znacznym stopniu złożonym, ze względu na konieczność wykonywania obliczeń pośrednich w celu uzyskania do niej danych wejściowych. Opracowana aplikacja Evapo* i jej możliwości techniczne pozwalają na znaczne ograniczenie tych niedogodności oraz przygotowanie podstawowych danych źródłowych w powszechnie znanym arkuszu kalkulacyjnym.

2. Przeprowadzona konfrontacja uzyskanych wyników obliczeń ewapotranspiracji oraz terminów pomiarowych z jakich pochodziły wybrane wartości ekstremalne wilgotności powietrza wskazuje na fakt, że aplikacja Evapo pozwala także na weryfikację poprawności doboru danych źródłowych do obliczeń. Zróznicowanie terminów pomiarowych zostało potwierdzone wynikami

obliczeń. W początku lat siedemdziesiątych obserwacje wieczorne były wykonywane o godzinie 21 natomiast w okresie późniejszym standardem była godzina 19.

3. W celu oceny skali adaptacji formuły Penman'a-Monteith'a w warunkach Wrocławia zasadne jest porównanie uzyskanych wyników drogą obliczeń z wynikami bezpośrednich pomiarów ewapotranspiracji powierzchni trawnika, jakie od początku lat 60-tych prowadzone są na terenie Obserwatorium Agrometeorologii Wrocław – Swojec. Interesujące byłoby przeprowadzenie przestrzennej weryfikacji tej formuły na terenie Polski, co z pewnością w znacznym stopniu może ułatwić aplikacja Evapo.

BIBLIOGRAFIA

- Bac S., Rojek M. *Meteorologia i klimatologia w inżynierii środowiska*. Wyd. Akademii Rolniczej we Wrocławiu, 1999: ss 315.
- Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements* – FAO Irrigation and drainage paper 56 z 1998 roku dostępny na stronie FAO: <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>
- Gąsiorek E., Kamińska J., Musiał E. *Modelowanie ewapotranspiracji wskaźnikowej w różnych regionach Polski*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, Nr 7/2008, PAN, 2008: 69-80.
- Flaga A. *Inżynieria wiatrowa*. Podstawy i zastosowania. Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 2008.
- Hossein D., Yamamoto T., Rasiah V. *Assessment of evapotranspiration estimation models in semi arid environments*. Agricultural Water Management, Vol. 64, 2004: 91-106.
- Kowalik P. *Agrohydrologia obliczeniowa*. Monografie KKGWPAN, Z. 33, 2010: ss. 207.
- Łabędzki L., Kanecka – Geszke E., Bąk B., Słowińska S. *Estimation of Reference Evapotranspiration using the FAO Penman-Monteith Method for Climatic Conditions of Poland*. Evapotranspiration. Ed. Łabędzki L., ISBN: 978 – 953 – 307 – 251 – 7, InTech, 2011: 276-294.
- Szajda J. *Ocena ewapotranspiracji rzeczywistej użytków zielonych na podstawie plonu aktualnego*. Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie, t.6, z. 1 (16), 2006: 403-412.

*Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę
w latach 2010-2013 jako projekt badawczy N N305 383539*

Sietan Chieng
UBC Civil Engineering,
002 - 6250 Applied Science Lane Vancouver,
B.C. Canada V6T 1Z4
Małgorzata Biniak-Pieróg
Andrzej Żyromski
Instytut Kształtowania i Ochrony Środowiska
Joanna Kamińska
Wiesław Szulczewski
e-mail: wieslaw.szulczewski@up.wroc.pl
Katedra Matematyki
Uniwersytet Przyrodniczy
Ul. Grunwaldzka 53
50-357 Wrocław