

Wpłynęło 29.03.2012 r.  
Zrecenzowano 18.06.2012 r.  
Zaakceptowano 18.06.2012 r.

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

## PROSTY MODEL EWAPOTRANSPIRACJI DLA WYBRANYCH ROŚLIN ENERGETYCZNYCH

**Andrzej ŻYROMSKI<sup>1) ABCDEF</sup>, Wiesław SZULCZEWSKI<sup>2) ABCDEF</sup>,  
Małgorzata BINIAK-PIERÓG<sup>1) ABCDEF</sup>, Hanna OKRASIŃSKA<sup>2) ABCDEF</sup>**

<sup>1)</sup> Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Kształtowania i Ochrony Środowiska

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

### Streszczenie

Pomiary terenowe ewapotranspiracji roślin są pracochłonne i wymagają specjalistycznej aparatury. Z tego też względu postanowiono opracować model umożliwiający ocenę ewapotranspiracji dobową w ciągu okresu wegetacji roślin na podstawie pomiarów terenowych ewapotranspiracji wierzby wiciowej (*Salix viminalis* L.) i ślazuca pensylwańskiego (*Sida hermaphrodita* (L.) Rusby), parowania z wolnej powierzchni wodnej i sum dobowych opadów atmosferycznych. Badania prowadzono na terenie Obserwatorium Agro- i Hydrometeorologii Wrocław – Swojec, należącego do Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Zagadnienie zostało rozwiązane za pomocą algorytmu genetycznego, który pozwala na uzyskanie najlepszego dopasowania szukanej funkcji do danych uzyskanych empirycznie. Oceny modelu dokonano na podstawie następujących wskaźników: RRMSE (ang. “Relative Root Mean Squared Error”), EF (ang. “Modeling Efficiency”), CRM (ang. “Coefficient of Residual Mass”), współczynnika korelacji oraz współczynnika determinacji. Weryfikacja modelu została przeprowadzona na zestawie danych dla tych samych roślin, jednak uzyskanych z innego ewaporometru. Przeprowadzone analizy dają podstawy do stwierdzenia, że opracowany model umożliwia obliczenie ewapotranspiracji rzeczywistej dla dwóch roślin energetycznych: ślazuca pensylwańskiego oraz wierzby wiciowej. Ze względu na krótki okres badań wymaga on jeszcze doprecyzowania na dłuższym ciągu pomiarowym.

**Słowa kluczowe:** ewapotranspiracja, model matematyczny, rośliny energetyczne

---

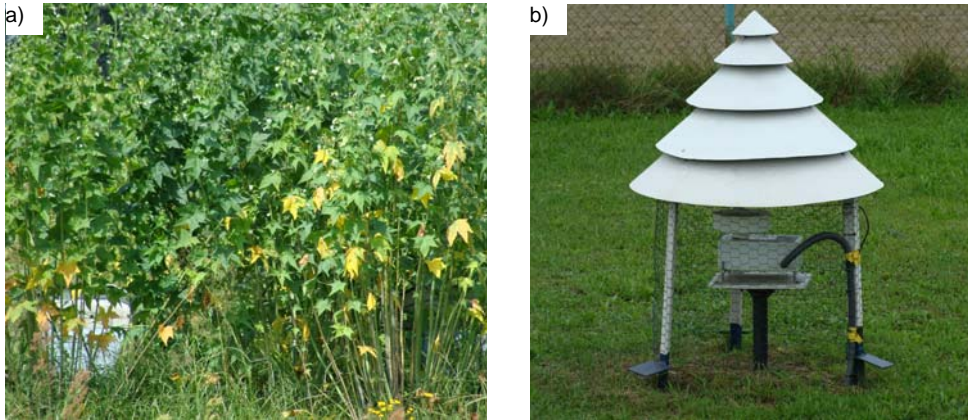
**Adres do korespondencji:** dr hab. inż. A. Żyromski, prof. nadzw., Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Kształtowania i Ochrony Środowiska, pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław; tel. +48 71 320-55-69, e-mail: andrzej.zyromski@up.wroc.pl

## WSTĘP

Prowadzone od wielu lat badania nad odnawialnymi źródłami energii skupiły się w dużym stopniu na roślinach, dających w okresie wegetacji możliwość uzyskania znacznej ilości biomasy, wykorzystywanej do produkcji biopaliwa bądź do bezpośredniego spalania, w celu przetworzenia na energię cieplną lub elektryczną. Najczęściej wykorzystywane do badań są: wierzba wiciowa (*Salix viminalis* L.), ślazowiec pensylwański (*Sida hermaphrodita* (L.) Rusby), miskant (*Miskanthus* sp.) i topinambur (słonecznik bulwiasty – *Helianthus tuberosus* L.). W prowadzonych badaniach podejmuje się często podstawowy problem, jakim jest wykorzystanie biomasy do produkcji energii elektrycznej i biopaliwa [HELLER i in. 2004; JEŻOWSKI 2003]. Ze względu na małe wymagania glebowe i nawozowe pierwsze miejsce pod względem zainteresowania zajmuje wierzba [DUBAS 2003; STOLARSKI i in. 2002; SZCZUKOWSKI i in. 2004]. Coraz częściej sięga się również po inne rośliny, na temat których mamy znaczną wiedzę, a mają inne, oprócz energetycznych, walory użytkowe, np. długi okres kwitnienia, pozwalający na zbieranie pożytku przez pszczoły. Taką rośliną jest ślazowiec pensylwański [BORKOWSKA, STYK 2006; DENISIUK 2005]. Produkcja biomasy wymaga dostępu do wody, bez której rośliny szybko zasychają, kończąc okres wegetacji i dając małe przyrosty [SŁAWIŃSKI i in. 2009]. Z tego też względu istotne są uwarunkowania ewapotranspiracji roślin energetycznych, które można rozpoznać jedynie poprzez badania eksperymentalne tego procesu. Badania modelowe, dotyczące transpiracji, prowadzone były między innymi przez KOWALIKA [2010]. Biorąc to pod uwagę, jako cel badań postawiono ocenę możliwości powiązania pomiarów terenowych ewapotranspiracji wybranych roślin energetycznych oraz procesu parowania z wolej powierzchni wody.

## METODY BADAŃ

Do realizacji tak postawionego celu wykorzystano wyniki pomiarów terenowych ewapotranspiracji wierzby wiciowej i ślazowca pensylwańskiego z okresu od kwietnia do października 2009 roku, prowadzonych na terenie Obserwatorium Agro- i Hydrometeorologii Wrocław – Swojec, należącego do Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Obserwacje ewapotranspiracji prowadzono dwukrotnie w ciągu doby, wykorzystując do tego celu ewaporometry glebowe UPZR, skonstruowane i eksploatowane na terenie Obserwatorium [BAC, JANGAS 1984, 1985] (fot. 1a). Ewaporometry mają powierzchnię 3000 cm<sup>2</sup> i miąższość monolitu glebowego 70 cm. W celu korekty pomiarów ewapotranspiracji wykorzystano również pomiary sum dobowych opadów atmosferycznych. Do pomiarów parowania z wolnej powierzchni wodnej wykorzystywany był programowalny ewaporometr EWP – 992 (fot. 1b) [A-STER].



Fot. 1. Ewaporometry: a) glebowy ze ślazowcem pensylwańskim (*Sida hermaphrodita* (L.) Rusby), b) ewaporometr EWP – 992; źródło: własne

Photo. 1. Soil evaporimetera: a) with *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby, b) – evaporimeter EWP – 992; source: own

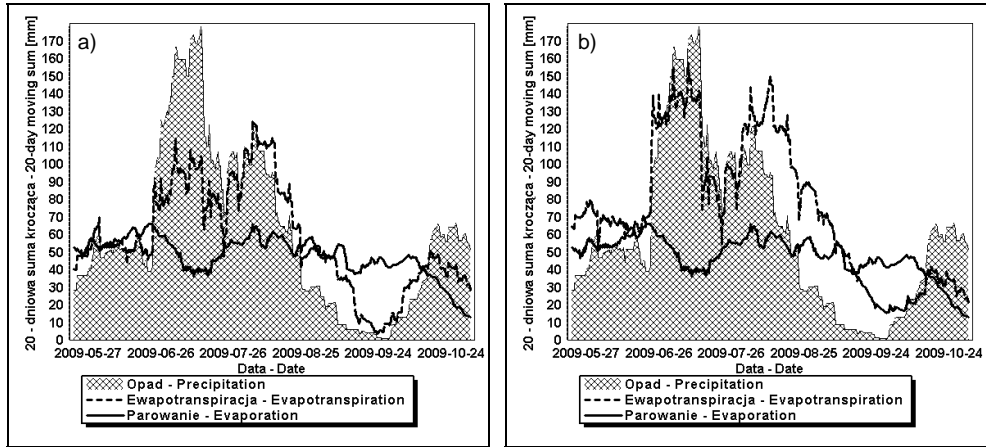
## WYNIKI BADAŃ

Poniżej przedstawiono próbę oszacowania wartości ewapotranspiracji ślazowca pensylwańskiego oraz wierzby wiciowej na podstawie dwóch zmiennych: opadów atmosferycznych i ewaporacji z wolnej powierzchni wody. Szacunek ten ma na celu stworzenie modelu, który umożliwiłby obliczenie ewapotranspiracji wspomnianych roślin energetycznych na podstawie jedynie tych dwóch zmiennych, unikając przez to czasochłonnych i kosztownych terenowych badań eksperymentalnych.

Do szczegółowej analizy wykorzystano sumy dobowe ewapotranspiracji wierzby wiciowej i ślazowca pensylwańskiego, uzyskane z ewaporometrów glebowych, dobowe sumy parowania z wolnej powierzchni wodnej oraz dobowe sumy opadów atmosferycznych z pomiarów terenowych. Dane obejmowały okres od kwietnia do października 2009 roku. Wyniki pomiarów terenowych zaprezentowano w formie graficznej (rys. 1). Stanowiły one dane wejściowe do modelu.

Na podstawie tych danych zaproponowano model WSMT (nazwa modelu powstała od pierwszych liter roślin energetycznych, nad którymi prowadzone są badania: wierzba, ślazowiec, miskant, topinambur), umożliwiający wyznaczenie wartości ewapotranspiracji rzeczywistej w kolejnych dniach wegetacji na podstawie opadu oraz ewaporacji z wolnej powierzchni wody:

$$F(\alpha, \beta, \gamma, \theta, \delta, n) = \sum_{i=n-19}^n ETR_i = \alpha \sum_{i=n-19}^n E_{0i} + \beta + \frac{\gamma \sum_{i=n-19}^n P_i}{1 + e^{\theta(n-\delta)}} \quad (1)$$



Rys. 1. Dane wejściowe do modelu WSMT: a) dla słazowca pensylwańskiego (*Sida hermaphrodita* (L.) Rusby), b) wierzby wiciowej (*Salix viminalis* L.); źródło: wyniki własne

Fig. 1. WSMT model input data: a) *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby, b) *Salix viminalis* L.; source: own studies

gdzie:

- $ETR_i$  – ewapotranspiracja rzeczywista w  $i$ -tym dniu wegetacji, mm;
- $E_{0i}$  – ewaporacja z wolnej powierzchni wodnej w  $i$ -tym dniu wegetacji, mm;
- $P_i$  – wielkość opadu atmosferycznego w  $i$ -tym dniu wegetacji, mm;
- $n$  –  $n$ -ty dzień wegetacji;
- $\alpha, \beta, \gamma, \theta, \delta$  – parametry modelu.

Wartości parametrów modelu określono, poszukując globalnego minimum funkcji wielu zmiennych, zdefiniowanej następująco:

$$f = \sum_n \left( F(\alpha, \beta, \gamma, \theta, \delta, n) - \bar{F}_n \right)^2 \quad (2)$$

gdzie:

$\bar{F}$  – suma ewapotranspiracji rzeczywistej dla dwudziestu dni – od  $n-19$  do  $n$ -tego dnia wegetacji, mm.

Zagadnienie zostało rozwiązane za pomocą algorytmu genetycznego, zaproponowanego przez PRICE'A i in. [2005], który umożliwia najlepsze dopasowanie szukanej funkcji do danych uzyskanych empirycznie.

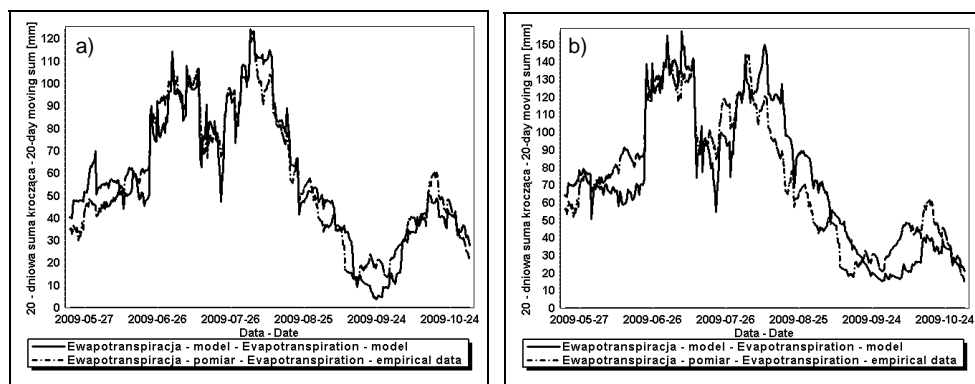
Wartości parametrów modelu, uzyskane za pomocą procedury poszukiwania globalnego minimum funkcji wielu zmiennych dla badanych roślin energetycznych przedstawiono w tabeli 1.

Dopasowanie przeprowadzono dla jednego zestawu danych dla każdej z badanych roślin i zostało przedstawione na wykresach (rys. 2).

**Tabela 1.** Wartości parametrów modelu WSMT**Table 1.** WSMT model parameters' values

Gatunek rośliny Plant species	Parametr Parameter				
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\theta$	$\delta$
Ślaziovec pensylwański ( <i>Sida hermaphrodita</i> (L.) Rusby)	1,65	-48,2	2,35	-0,002	460
Wierzba wiciowa ( <i>Salix viminalis</i> L.)	2,36	-76,9	0,5	-0,39	62

Źródło: wyniki własne. Source: own studies.



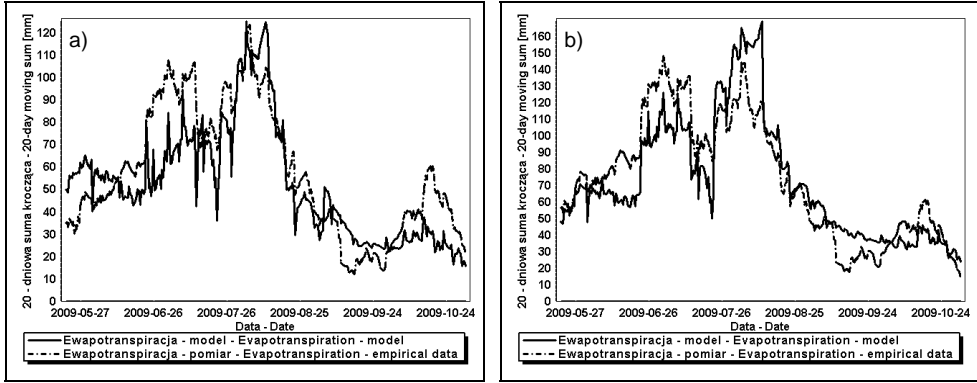
Rys. 2. Dopasowanie modelu WSMT do danych empirycznych: a) dla ślaziowca pensylwańskiego (*Sida hermaphrodita* (L.) Rusby), b) wierzby wiciowej (*Salix viminalis* L.); źródło: wyniki własne

Fig. 2. WSMT model fit to empirical data: a) *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby, b) *Salix viminalis* L.); source: own study

Wstępna weryfikacja modelu została przeprowadzona na zestawie danych dla tych samych roślin, jednak uzyskanych z innego ewaporometru. Próba opracowania związku ilościowego, który umożliwi oszacowanie ewapotranspiracji na podstawie opadu i parowania z wolnej powierzchni wody, została podjęta po raz pierwszy i dlatego, ze względu na małą liczbę danych otrzymanych empirycznie, weryfikacja modelu mogła zostać przeprowadzona jedynie w taki sposób. Wyniki weryfikacji przedstawiono graficznie (rys. 3).

Ocena modelu została dokonana na podstawie następujących wskaźników: RRMSE (ang. “Relative Root Mean Squared Error”), EF (“Modeling Efficiency”), CRM (“Coefficient of Residual Mass”), współczynnika korelacji oraz współczynnika determinacji. W przypadku powyższych wskaźników przyjmujemy, że  $O_i$  oznacza wartości obserwowane,  $P_i$  wartości przewidywane uzyskane z modelu, natomiast  $\bar{O}$  – wartość średnią z danych obserwowanych.

Stosując kryterium EF [LOAGUE, GREEN 1991], porównuje się błędy przewidywań w otoczeniu wartości średniej mierzonej wielkości. Jak widać z poniższego wzoru, EF nie jest ograniczony z dołu, z kolei maksymalną wartością, jaką może



Rys. 3. Wyniki weryfikacji modelu WSMT: a) dla sławowca pensylwańskiego (*Sida hermaphrodita* (L.) Rusby), b) dla wierzy wiciowej (*Salix viminalis* L.); źródło: opracowanie własne

Fig. 3. WSMT model verification: a) *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby, b) *Salix viminalis* L.; source: own study

przyjmować – jest 1. Ujemne jego wartości świadczą o złym dopasowaniu przewidywań do mierzonej wielkości. Wyraża się ono następującym wzorem:

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

Kolejnym kryterium trafności dopasowania modelu do danych pomiarowych jest RRMSE [BELLOCCHI i in. 2002; FOX 1981]. Wskaźnik ten może przyjmować jedynie dodatnie wartości. Za jego pomocą mierzy się średnie, względne odchylenia między wartościami przewidywanymi w modelu a rzeczywistymi. Oczywiście, im RRMSE jest bliższy zero, tym lepsze są przewidywania odnoszące się do pomiarów.

$$RRMSE = \frac{\left( \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n \right)^{0,5}}{\bar{O}} \quad (4)$$

Wskaźnik CRM [LOAGUE, GREEN 1991] – podobnie jak EF – może przyjmować ujemne wartości. Jest on miarą względnych różnic między wartościami przewidywanymi a obserwowanymi. Maksymalną jego wartością jest 1, a im bardziej jest ujemny, tym mniej dokładnie model opisuje wartości mierzone.

$$CRM = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (5)$$

Weryfikację poprawności modelu przeprowadzono w dwóch etapach. Pierwszy z nich to określenie zgodności przewidywanych danych z wartościami ewapotranspiracji, uzyskanymi eksperymentalnie (tab. 2).

**Tabela 2.** Wartości miar dopasowania modelu WSMT dla rozpatrywanych roślin energetycznych w I etapie weryfikacji

**Table 2.** Values of WSMT model fitting measures for considered energy crops on the 1<sup>st</sup> stage of verification

Gatunek rośliny Plant species	Kryteria oceny modelu Model evaluation criteria				
	RRMSE	EF	CRM	R	R <sup>2</sup>
Ślaziozec pensylwański ( <i>Sida hermaphrodita</i> (L.) Rusby)	0,007	1	0	0,957	0,908
Wierzba wiciowa ( <i>Salix viminalis</i> L.)	0,005	1	0	0,911	0,795

Objaśnienia: Explanations: RRMSE – Relative Root Mean Squared Error, EF – Modeling Efficiency, CRM – Coefficient of Residual Mass, R – correlation coefficient, R<sup>2</sup> – determination coefficient.

Źródło: wyniki własne. Source: own studies.

Uzyskane wyniki dopasowania są zadowalające i bliskie wartościom bardzo dobrego dopasowania modelu.

Na drugim etapie weryfikacji sprawdzono wiarygodność modelu dla danych uzyskanych z niezależnego eksperymentu polowego (tab. 3).

**Tabela 3.** Wartości miar dopasowania modelu WSMT dla rozpatrywanych roślin energetycznych w II etapie weryfikacji

**Table 3.** Values of WSMT model fitting measures for considered energy crops on the 2<sup>nd</sup> stage of verification

Gatunek rośliny Plant species	Kryteria oceny modelu Model evaluation criteria				
	RRMSE	EF	CRM	R	R <sup>2</sup>
Ślaziozec pensylwański ( <i>Sida hermaphrodita</i> (L.) Rusby)	0,005	1	-0,099	0,837	0,662
Wierzba wiciowa ( <i>Salix viminalis</i> L.)	0,008	1	-0,02	0,87	0,736

Objaśnienia, jak pod tabelą 2. Explanations as in Tab. 2.

Źródło: wyniki własne. Source: own studies.

Wartości wskaźników uzyskane w drugim etapie weryfikacji modelu uległy pogorszeniu, jednak pozostają w granicach, świadczących o jego poprawności.

## PODSUMOWANIE

Opracowany model umożliwia obliczenie ewapotranspiracji rzeczywistej dla dwóch roślin energetycznych – ślazuca pensylwańskiego oraz wierzby wiciowej. Do jego opracowania wykorzystano dane eksperymentalne, pochodzące jedynie z jednego sezonu pomiarowego i dotyczące sum dobowych ewapotranspiracji i parowania z wolnej powierzchni wody oraz sum dobowych opadów atmosferycznych. Przeprowadzone badania dla tych dwóch gatunków roślin energetycznych oraz uzyskane za pomocą modelu wyniki potwierdzają celowość prowadzonych w tym zakresie prac. Pozyskanie większej liczby danych eksperymentalnych umożliwi pełniejszą weryfikację zaproponowanego modelu.

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

## LITERATURA

- A-STER. Ewaporometr EWP – 992. Instrukcja obsługi. Kraków ss. 21.
- BAC S., JANGAS J. 1984. Urządzenie do pomiarów i rejestracji parowania, osadów i opadów atmosferycznych. W: Problematyka hydrologiczna i meteorologiczna małych zlewni rzecznych. Materiały Ogólnopolskiego Sympozjum Naukowego. Wrocław. PTGeof. s. 5–7.
- BAC S., JANGAS J. 1985. Wzór użytkowy nr 59735. Urządzenie do pomiaru i rejestracji zmian masy, zwłaszcza niektórych elementów bilansu wodnego.
- BELLOCCHI G., ACUTIS M., FILA G., DONATELLI M. 2002. An indicator of solar radiation model performance based on a fuzzy expert system. *Agronomy Journal*. Vol. 94 s. 1222–1233.
- BORKOWSKA H., STYK B. 2006. Ślazuwiec pensylwański (*Sida hermaphrodita* Rusby). Uprawa i wykorzystanie. Wyd. 2. Lublin. Wydaw. AR. ISBN 83-72951-42-3 ss. 69.
- DENISIUK W. 2005. Możliwości wykorzystania ślazuca pensylwańskiego w energetyce. *Inżynieria Rolnicza*. Nr 6 s. 105–113.
- DUBAS J.W. 2003. Wierzba energetyczna – uprawa i technologie przetwarzania. Bytom. Wyższa Szkoła Ekonomii i Administracji ss. 138.
- FOX D.G. 1981. Judging air quality model performance: a summary of the AMS workshop on dispersion models performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Vol. 62 s. 599–609.
- HELLER M.C., KEOLEIAN G.A., MANN M.K., VOLK T.A. 2004. Life cycle energy and environmental benefits of generating electricity from willow biomass. *Renewable Energy*. Vol. 29. Iss. 7 s. 1023–1042.
- JEZOWSKI S. 2003. Rośliny energetyczne – produktywność oraz aspekt ekonomiczny, środowiskowy i socjalny ich wykorzystania jako biopaliwa. *Postępy Nauk Rolniczych*. T. 3 s. 61–72.
- KOWALIK P. 2010. Agrohydrologia obliczeniowa. Monografie KGW PAN. Z. 33. ISSN 0867-7816 ss. 207.
- LOAGUE K., GREEN R.E. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *Journal Contaminant Hydrology*. Vol. 7 s. 51–73.
- PRICE K.V., STORN R.M., LAMPINEN J.A. 2005. Differential evolution – A practical approach to global optimization. Berlin, Heidelberg. Springer Verl. ISBN 978-3-540-20950-8 ss. 538.
- SŁAWIŃSKI C., CYMERMAN J., ŁAMORSKI K., RYŻAK M. 2009. Stosunki wodne w wybranych glebach pod wierzbą krzewiastą i ślazuwcem pensylwańskim. *Acta Agrophysica*. No 14(2) s. 479–489.



- STOLARSKI M., SZCZUKOWSKI S., TWORKOWSKI J. 2002. Produktywność klonów wierzb krzewiastych uprawianych na gruntach ornych w zależności od częstotliwości zbioru i gęstości sadzenia. *Fragmenta Agronomica*. No 2 s. 39–51.
- SZCZUKOWSKI S., TWORKOWSKI J., STOLARSKI M., PRZYBOROWSKI J. 2004. Plon biomasy wierzb krzewiastych pozyskiwanych z gruntów rolniczych w cyklach jednorocznych. *Fragmenta Agronomica*. No 2 s. 5–18.

*Andrzej ŻYROMSKI, Wiesław SZULCZEWSKI,  
Małgorzata BINIAK-PIERÓG, Hanna OKRASIŃSKA*

## **SIMPLE MODEL OF EVAPOTRANSPIRATION OF SELECTED ENERGY PLANTS**

**Key words:** *energy plants, evapotranspiration, mathematical model*

### **S u m m a r y**

Field measurements of evapotranspiration are time consuming and require specialized equipment. For this reason, basing on field measurements of common osier and Virginia fanpetals' evapotranspiration, evaporation from free water surface and daily precipitation sums, it was decided to develop mathematical model allowing to estimate evapotranspiration during growing season. The study was conducted in the area of Agro and Hydrometeorology Observatory located in Wrocław – Swojec, that belongs to Wrocław University of Environmental and Life Sciences. The problem was solved using the genetic algorithm, which allowed to obtain the best fit of the function to the data obtained empirically. Model evaluation was based on the following indices: RRMS (Relative Root Mean Squared Error), EF (Modeling Efficiency), CRM (Coefficient of Residual Mass), the correlation and determination coefficients. Model verification was performed for the data of the same plants, but obtained for another evaporimeter. The analyzes led to the conclusion that the developed model allowed to calculate actual evapotranspiration for two energy plants: Virginia fanpetals and common osier. However, the short period of field measurements requires further clarification basing on longer observation series.