

PORÓWNANIE WYBRANYCH MODELI DO SZACOWANIA PAROWANIA
POTENCJALNEGO W OKRESIE ZIMOWYM DLA POTRZEB
MODELOWANIA HYDROLOGICZNEGO

Stanisław Bac¹, Sławomir Iwański², Leszek Kuchar²

¹Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Oddział we Wrocławiu,
ul. Parkowa 30, 51-616 Wrocław
e-mail: Sekretariat.Wroclaw@imgw.pl

²Katedra Matematyki, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu,
ul. Grunwaldzka 53, 50-357 Wrocław

Streszczenie. W pracy porównano trzy wybrane modele służące do obliczania sum miesięcznych parowania dla półroczia zimowego: wzór Turca, jego modyfikacja oraz model liniowy. Badania przeprowadzono na podstawie obserwacji pochodzących z Obserwatorium Agro- i Hydrologicznego Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Wielkość parowania z wolnej powierzchni wodnej mierzona była ewaporometrem Wilda. Zaprezentowane nowe wersje wzorów szacujących sumy parowania pozwoliły na poprawę opisu zjawiska w zależności od rozważanego miesiąca.

Słowa kluczowe: bilans wodny, parowanie potencjalne i terenowe, wzór Turca, metoda najmniejszych kwadratów

WSTĘP

Bilans wodny zlewni jest podstawową informacją wykorzystywaną przez gospodarkę wodną (Kędziora 1995, Jaworski 1997, Somorowski 1998, Chełmicki 2002). Do określenia ilościowego obiegu wody w przyrodzie niezbędna jest wiedza na temat jej przychodów i strat w badanej zlewni. O ile przychody są łatwe do oszacowania, ponieważ pomiary opadów są wykonywane we wszystkich stacjach i posterunkach meteorologicznych, to wielkość parowania z powierzchni terenu, występująca jako jedna ze składowych po stronie strat, jest mierzona jedynie tylko w wybranych stacjach meteorologicznych. Dodatkowo pomiary te są wykonywane różnymi metodami co utrudnia możliwość ich porównywania. Stąd wiele prac naukowych poświęconych jest badaniom nad zależnościami pomiędzy wynikami parowania a ogólnie dostępnymi wielkościami elementów meteorolo-

gicznych (Bac 1989, Jaworski 1997, Bryś 1998, Bac i Rojek 1999, Bac i Kuchar 2001a). Prawie wszystkie metody skupiają się na uzyskaniu wielkości parowania potencjalnego lub wskaźnikowego jako punktu odniesienia do oszacowania wielkości parowania terenowego. Stąd, między innymi, szczególną uwagę zwrócono na wzór Turca (Turc 1961).

W niniejszej pracy autorzy porównali wyniki otrzymane w okresie zimowym dla oryginalnego wzoru Turca wraz z jego modyfikacjami (Bac i Kuchar 2001a, Bac i Kuchar 2001b, Kuchar i Bac 2006) z wynikami otrzymanymi dla zaproponowanego modelu liniowego. Zaletą nowego modelu liniowego jest tylko uwzględnienie łatwo dostępnych lub możliwych do oszacowania z dużą dokładnością danych: sumy promieniowania całkowitego i temperatury średniej.

MATERIAŁY I METODY

Z uwagi na małą, w stosunku do zapotrzebowania, liczbą punktów mierzących wielkość parowania, powstało wiele wzorów umożliwiających przybliżenie wartości tej zmiennej (Penman 1948, Mintz i Walker 1993, Bac i Rojek 1999, Bac i Kuchar 2001b, Jaworski i Szkutnicki 2001). Podstawą do oszacowania parowania z powierzchni terenu do atmosfery jest parowanie potencjalne lub wskaźnikowe, za które przyjmuje się coraz częściej sumę parowania z wolnej powierzchni wodnej ciekłej lub zamrożonej (Bac 1989, Kuchar i Bac 2001, Kowanetz 2004).

W literaturze poświęcono także wiele miejsca zagadnieniu parowania w okresie zimowym tj. w sytuacjach, gdy średnia temperatura w miesiącu jest bliska bądź mniejsza od zera. W tabeli 1 przedstawiono sumy parowania w okresach zimowych wyznaczone metodą bilansu wodnego (Somorowski 1998, Jaworski i Szkutnicki 2001), bilansu cieplnego (Kapuściński 2000), dyfuzji turbulencyjnej (Konstantinow 1968), parowania potencjalnego (Kędziora 1995), wskaźnikowego według Baca (Bryś 1998) oraz pomiarów ewaporometru Wilda we Wrocławiu (Kuchar i Bac 2001).

Z uwagi na niedomiar opadów oraz zimowe zmiany retencji podłoża, ocena parowania metodą bilansu wodnego jest bardzo trudna. Ocenia się, że parowanie i sublimacja śniegu ma istotne znaczenie dla zasilania podczas roztopów. Jest to spowodowane tym, że straty do atmosfery mogą sięgać około 50% zasobów wodnych pokrywy śnieżnej (Szkutnicki 2001). Stwierdzono, że parowanie terenowe podczas półrocza zimowego waha się od 65 do 106 mm, natomiast parowanie potencjalne lub z wolnej powierzchni od 128 do 181 mm.

W pracy do określenia wielkości parowania potencjalnego wykorzystano wzór Turca (Turc 1961), który w oryginalnej wersji (1) jest wykorzystywany wyłącznie w sezonie letnim.

$$E_p = 0.4 \cdot T_{sr} \frac{SR + 50}{T_{sr} + 15} \quad (1)$$

gdzie E_p – parowanie potencjalne, T_{sr} – średnia temperatura powietrza, SR – suma promieniowania całkowitego. Wszystkie wielkości mierzone w okresach miesięcznych.

Tabela 1. Sumy parowania w mm dla wybranych okresów zimowych (Kuchar i Bac 2006)
Table 1. Total evaporation in mm for a given winter time period (Kuchar and Bac 2006)

Parowanie Terenowe Field Evaporation	Okres czasu – Time Period			
	XII-III	XI-IV	I	III
Somorowski	22	65	–	–
Jaworski i Szkutnicki	40	87	6	21
Kapuściński	51	102	9	21
Konstantinow	68	106	7	39
Parowanie potencjalne Potential Evaporation				
Kędziora	75	172	15	39
Parowanie z wolnej powierzchni Free Surface Evaporation				
Bac	86	168	15	40
Wild	96	181	18	43

Modyfikację wzoru Turca (2) polegającą na uzmiennieniu stałych we wzorze oraz dodaniu wyrazu stałego z powodzeniem została skalibrowana i wykorzystywana przy modelowaniu hydrologicznym także dla okresu zimowego (Bac i Kuchar 2001a, Bac i Kuchar 2001b, Kuchar i Bac 2006).

$$E_p = a_0 + a_1 T_{sr} \frac{a_2 SR + a_3}{T_{sr} + a_4} \quad (2)$$

gdzie a_i są parametrami modelu, a pozostałe oznaczenia są jak przy wzorze (1).
 A także model liniowy postaci:

$$E_p = b_0 + b_1 T_{sr} + b_2 SR \quad (3)$$

gdzie b_i są parametrami modelu, a pozostałe oznaczenia są takie jak wyżej.

Parametry dla każdego okresu w modelach (2) i (3) zostały oszacowane metodą najmniejszych kwadratów wykorzystując oprogramowanie MATLAB. W ten sposób uzyskano zestawy współczynników dla każdego z 6 miesięcy sezonu chłodnego oraz dla trzech grup miesięcy: z $T_{sr} < 10^{\circ}\text{C}$, z $T_{sr} < 5^{\circ}\text{C}$, z $T_{sr} < 0^{\circ}\text{C}$.

Wykorzystane modele oceniono przy pomocy średnich błędów kwadratowego (4), średniego błędów bezwzględnych (5) oraz średniego błędów względnego (6):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - \hat{E}_i)^2 \quad (4)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_i - \hat{E}_i| \quad (5)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|E_i - \hat{E}_i|}{E_i} \quad (6)$$

gdzie w obu wzorach przyjęto następujące oznaczenia: E_i – wielkość parowania potencjalnego, \hat{E}_i – oszacowanie parowania potencjalnego, n – liczba lat przyjęta do estymacji parametrów.

Do przeprowadzenia obliczeń wykorzystano dane pochodzące z Obserwatorium Agro- i Hydrometeorologii Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Dane te obejmują miesięczne sumy wielkości parowania mierzone ewaporometrem Wilda z powierzchnią parującą znajdującą się na wysokości 50 cm nad powierzchnią terenu pod przewiewną osłoną wykluczającą wpływ opadów, średnie miesięczne temperatury powietrza oraz miesięczne sumy promieniowania całkowitego.

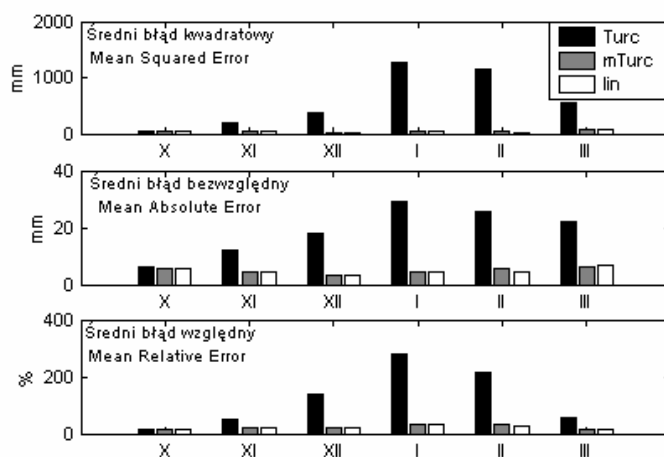
WYNIKI I DYSKUSJA

W tabeli 2 przedstawiono podstawową miesięczną charakterystykę zmiennych meteorologicznych pochodzących z Obserwatorium Agro- i Hydrometeorologicznego Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu z lat 1961-1995 bezpośrednio związanych z szacowaniem parowania i wykorzystanych przy ocenie modeli.

W pracy Kuchar i Bac (2006) wykazano, że wyliczone wielkości parowania potencjalnego za pomocą oryginalnego wzoru Turca dla miesięcy półroczia zimowego (od października do marca) wskazują na brak dopasowania do wartości obserwowanych. Otrzymane średnie błędy oszacowania są na bardzo wysokim poziomie w porównaniu z wynikami otrzymanymi dla zmodyfikowanego wzoru Turca oraz dla modelu liniowego. W przypadku okresów miesięcznych wyjątek stanowi październik, gdzie uzyskane błędy znajdują się na porównywalnym poziomie (rys. 1).

Tabela 2. Wartości średnie i odchylenie standardowe parowania potencjalnego, sum promieniowania całkowitego i temperatury powietrza w kolejnych miesiącach półrocza chłodnego (Kuchar i Bac 2006)
Table 2. Means values and standard deviations of potential evaporation, total solar radiation and air temperature for the successive months of cold season (Kuchar and Bac 2006)

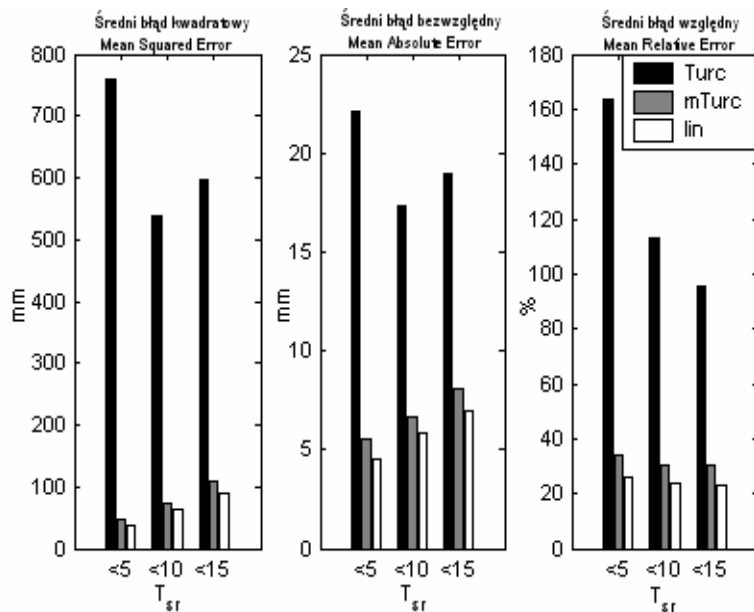
Miesiąc Month	Średnia ± odchylenie standardowe – Mean ± standard deviation		
	Parowanie potencjalne Potential Evaporation (mm)	Promieniowanie całkowite Total Radiation (MJ·m ⁻²)	Temperatura powietrza Air Temperature (°C)
X	37,1 ± 10,1	201,8 ± 31,8	8,9 ± 1,4
XI	23,0 ± 6,9	87,7 ± 14,6	3,9 ± 1,7
XII	17,2 ± 7,0	62,7 ± 20,2	0,2 ± 2,5
I	17,7 ± 9,5	81,9 ± 10,2	- 1,4 ± 3,6
II	18,4 ± 9,2	134,7 ± 21,8	- 0,2 ± 3,1
III	43,4 ± 13,9	260,0 ± 33,6	3,5 ± 2,4



Rys. 1. Średnie błędy oszacowania uzyskane dla oryginalnego (Turc) i zmodyfikowanego (mTurc) wzoru Turca oraz dla modelu liniowego (lin) w miesiącach od października do marca

Fig. 1. Mean errors of estimation for original (Turc) and modified (mTurc) Turc’s formula and linear model (lin) in the months from October to March

W przypadku pogrupowania miesięcy ze względu na wartość temperatury średniej, uzyskane wyniki wykazują, że oryginalny wzór Turca uzyskuje o wiele gorsze wyniki (kilkakrotnie wyższe błędy) w porównaniu z pozostałymi dwoma prezentowanymi modelami (rys. 2), a najlepiej wypada najprostszy model liniowy, zaprezentowany w niniejszej pracy.

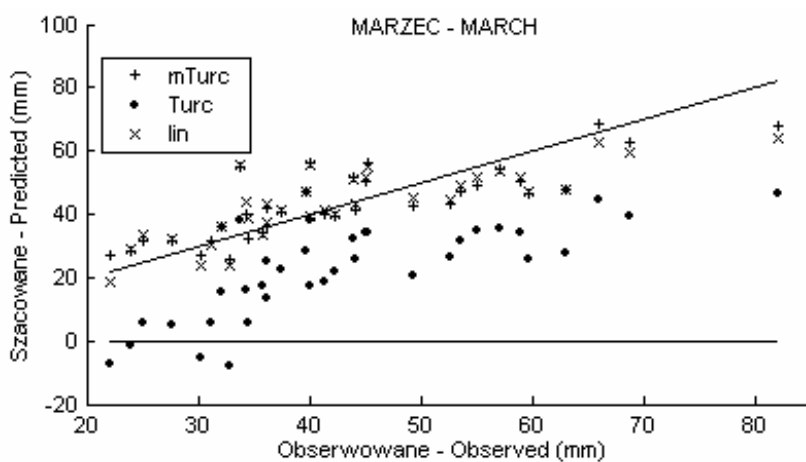


Rys. 2. Średnie błędy oszacowania uzyskane dla oryginalnego (Turc) i zmodyfikowanego (mTurc) wzoru Turca oraz dla modelu liniowego (lin) w miesiącach o temperaturze średniej mniejszej niż 5°C, 10°C i 15°C

Fig. 2. Mean errors of estimation for original (Turc) and modified (mTurc) Turc's formula and linear model (lin) in months with mean temperature less than 5°C, 10°C and 15°C

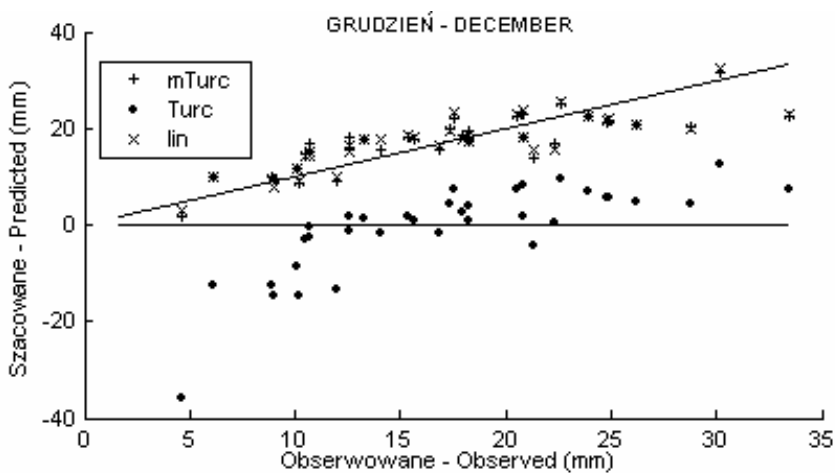
Na wykresach (rys. 3-5) przedstawiono wartości parowania potencjalnego obserwowane względem oszacowanych za pomocą analizowanych modeli dla dwóch przykładowych miesięcy: marca i grudnia. Widoczne jest niedoszacowanie wielkości parowania (a nawet uzyskiwanie wartości ujemnych) za pomocą oryginalnego wzoru Turca. Sytuacja ta występuje także w pozostałych miesiącach okresu zimowego z wyjątkiem października.

Uzyskana modyfikacja wzoru Tuca w znaczący sposób poprawiła oszacowania parowania potencjalnego na podstawie temperatury średniej i promieniowania całkowitego. Jednak idąc za spostrzeżeniem Kuchara i Baca (2006), że dalsze doskonalenie opisu zjawiska może odbywać się poprzez wprowadzenie nowego równania funkcyjnego, w niniejszej pracy zaprezentowano model liniowy umożliwiający lepsze oszacowanie wielkości parowania w miesiącach o niskich temperaturach średnich (rys. 2). W tabeli (tab. 3 i 4) przedstawiono uzyskane wartości parametrów modelu liniowego oraz zmodyfikowanego modelu Turca w zależności od rozpatrywanego przypadku.



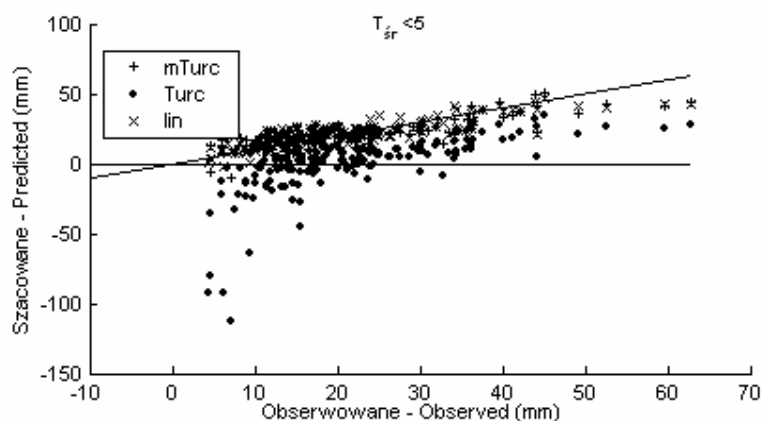
Rys. 3. Parowanie potencjalne obserwowane względem oszacowanego dla oryginalnego (Turc) i zmodyfikowanego (mTurc) wzoru Turca oraz dla modelu liniowego (lin) w marcu

Fig. 3. Observed potential evaporation versus predicted according to original (Turc) and modified (mTurc) Turc's formula and linear model (lin) in March



Rys. 4. Parowanie potencjalne obserwowane względem oszacowanego dla oryginalnego (Turc) i zmodyfikowanego (mTurc) wzoru Turca oraz dla modelu liniowego (lin) w grudniu

Fig. 4. Observed potential evaporation versus predicted according to original (Turc) and modified (mTurc) Turc's formula and linear model (lin) in December



Rys. 5. Parowanie potencjalne obserwowane względem oszacowanego dla oryginalnego (Turc) i zmodyfikowanego (mTurc) wzoru Turca oraz dla modelu liniowego (lin) dla miesięcy o temperaturze średniej mniejszej od 5°C

Fig. 5. Observed potential evaporation versus predicted according to original (Turc) and modified (mTurc) Turc's formula and linear model (lin) in months with mean temperature less than 5°C

Tabela 3. Wartości parametrów modelu liniowego i współczynnika determinacji R^2
Table 3. Values of linear model parameters and R^2 coefficient

Parametr Parameter	Miesiące z temperaturą średnią mniejszą od Months with mean temperature less than		
	15°C	10°C	5°C
b_0	9,11	8,10	10,12
b_1	1,12	1,54	1,94
b_2	0,10	0,10	0,09
R^2	0,83	0,81	0,69

Tabela 4. Wartości parametrów zmodyfikowanego modelu Turca
Table 4. Values of parameters of modified Turc's formula

Parametr Parameter	Miesiące z temperaturą średnią mniejszą od Months with mean temperature less than		
	15°C	10°C	5°C
a_0	21,81	20,13	20,08
a_1	0,27	0,60	1,00
a_2	1,00	0,96	1,00
a_3	3,82	-21,15	-16,76
a_4	19,19	32,29	47,22

WNIOSEK

W oparciu o uzyskane wyniki można stwierdzić, że zmodyfikowany wzór Turca umożliwia w sposób zadowalający oszacować wielkość parowania potencjalnego dla miesięcy półrocza chłodnego w warunkach rejonu Wrocławia i południowo-zachodniej Polski. W wyniku zmiany formuły opisującej badane zjawisko na model liniowy uzyskano znaczną poprawę otrzymywanych wyników w stosunku do zmodyfikowanego wzoru Turca. Lepszą poprawę uzyskano dla miesięcy o najniższych temperaturach średnich. Wyniki skłaniają do polecenia stosowania formuły liniowej dla miesięcy okresu zimowego.

PIŚMIENNICTWO

- Bac S., 1989. Współzależność miesięcznych i dekadowych wielkości ewapotranspiracji według Penmana z parowaniem z wolnej powierzchni wodnej w świetle dwudziestoletnich badań, *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, Ser. Mel.*, 191, 99-109.
- Bac S., Rojek M., 1999. *Meteorologia i klimatologia w inżynierii środowiska*. Wyd. AR we Wrocławiu
- Bac S., Kuchar L., 2001a. Modyfikacja wzoru do obliczania wielkości parowania potencjalnego według Turca, *Annales Univ. Mariae Curie-Skłodowska Lublin-Polonia, Sectio B, Vol. LV/LVI, 5*, 42-49.
- Bac S., Kuchar L., 2001b. Modyfikacja wzoru Turca dla rejonu Wrocławia, *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, Ser. Inż. Środ. XII*, 413, 263-270.
- Bryś K., 1998. Rola czynnika radiacyjnego w ewapotranspiracji. *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, Ser. Inż. Środ.*, 349, 17-51.
- Chelmiński W., 2002. *Woda. Zasoby, degradacja, ochrona*, Wyd. PWN.
- Jaworski J., 1997. Parowanie terenowe [w] *Hydrologia dynamiczna*, 139-184.
- Jaworski J., Szkutnicki J., 2001. Procesy hydrologiczne w zlewni górnej Wilgi, *PTGeof., Atlasy i monografie, IMGW*.
- Kapuściński J., 2000. Struktura bilansu wodnego powierzchni czynnej na tle warunków klimatycznych środkowo-zachodniej Polski, *Rocz. AR w Poznaniu, Rozprawy*, z. 203.
- Kędziora A., 1995. *Podstawy agrometeorologii*, PWRiL.
- Konstantinow A.R., 1968. *Isparenije w prirode*, Gimiz.
- Kowanetz L., 2004. Zakres zmienności wskaźników parowania w zachodniej części Karpat Polskich, *Współcz. Probl. Inż. Środ.*, AR we Wrocławiu, 63-78.
- Kuchar L., Bac S., 2001. Ocena parowania potencjalnego w latach 1990-2030 szacowanego według wzoru Turca i scenariusza zmian klimatu GISS na podstawie danych z Obserwatorium Agro- i Hydrometeorologicznego Akademii Rolniczej we Wrocławiu, *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, Ser. Inż. Środ. XII*, 413, 129-138.
- Kuchar L., Bac S., 2006. Szacowanie parowania potencjalnego w okresie zimowym za pomocą zmodyfikowanego wzoru Turca dla potrzeb modelowania hydrologicznego [w] *Aktualne problemy rolnictwa, gospodarki żywnościowej i ochrony środowiska*, Wyd. AR we Wrocławiu, 205-214.
- Mintz, Y., Walker, G.K., 1993. Global fields of soil moisture and land surface evapotranspiration derived from observed precipitation and surface air temperatures. *Journ. Appl. Meteor.*, 32, 1305-1334
- Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Meteorol. Soc.*, A, 193, 120-145.

- Somorowski C., 1998. Rola retencji w obiegu wody w zlewni rzecznej, wodno-bilansowe kryteria kształtowania siedlisk w krajobrazie rolniczym, Wyd. SGGW, 92-102.
- Szkutnicki J., 1978: Parowanie i sublimacja z pokrywy śnieżnej na podstawie badań eksperymentalnych na Hali Gąsienicowej, Wiad. IMGW, t. IV, z. 4: 99-52.
- Turc L., 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation, evapotranspiration potentielle, Ann. Agron., 12, 13-49.

ESTIMATION OF POTENTIAL EVAPORATION FOR WINTER SEASON FOR THE NEEDS OF HYDROLOGICAL MODELLING

Stanisław Bac¹, Sławomir Iwański², Leszek Kuchar²

¹Institute of Meteorology and Water Management, Wrocław Division
ul. Parkowa 30, 51-616 Wrocław

²Faculty of Mathematics, University of Life Sciences in Wrocław
ul. Grunwaldzka 53, 50-357 Wrocław

Abstract. The paper presents a comparison of three selected models: Turc's formula, modification of Turc's monthly formula, and linear model for assessing potential evaporation (i.e. evaporation from water surface) for the cold half-year period. Analyses were carried using 35-year long monthly data of potential evaporation, mean air temperature and solar radiation. Modification of Turc's formula was made by parameterisation of equation and introducing an additional coefficient. Parameter estimation of all presented models was done by the least square method. Test of new formulae for winter months has shown lower errors, depending on considered month.

Keywords: water balance, potential and field evaporation, Turc's formula, least square method