

ANDRZEJ BOCZOŃ, ANDRZEJ BRANDYK, MICHAŁ WRÓBEL, ANNA KOWALSKA

Transpiracja drzewostanu i ewapotranspiracja ekosystemu sosnowego w powiązaniu z ewapotranspiracją potencjalną wyznaczoną różnymi metodami*

Transpiration of a stand and evapotranspiration of Scots pine ecosystem in relation to the potential evapotranspiration estimated with different methods

ABSTRACT

Boczoń A., Brandyk A., Wróbel M., Kowalska A. 2015. Transpiracja drzewostanu i ewapotranspiracja ekosystemu sosnowego w powiązaniu z ewapotranspiracją potencjalną wyznaczoną różnymi metodami. Sylwan 159 (8): 666-674.

The aim of the study was to estimate the transpiration (*TR*) and actual evapotranspiration (*EVT*) of Scots pine stand, i.e. a typical Polish forest ecosystem. The study was performed in the 74-year-old stand growing on poor sandy soil. Transpiration of pine trees was determined by sap flow measurements of some individual trees by Thermal Dissipation Probe method. Actual evapotranspiration was determined based on measurements of soil moisture using Time Domain Reflectometry method and on changes in soil water storage. Based on these results, the reduction ratios were determined to estimate *TR* and *EVT* from potential evapotranspiration (*ETP*) calculated according to Priestley-Taylor (PT), Hargreaves (H), Makkink (M), Penman (Pen org), Penman-Shuttleworth (Pen Shut), the FAO Penman Monteith (FAO PM) and Penman Monteith (PM) methods. Measured transpiration of Scots pine stand reached 56% of the actual evapotranspiration. The methods used for the calculation of the *ETP* can be ranked in terms of the results from the lowest to the highest: M<H<FAO PM<PM<Pen org<Pen Shut<PT. Evapotranspiration calculated by Makkink method was consistent with the results of actual evapotranspiration measurements. The reduction factors of *ETP* were calculated for transpiration in a Scots pine stand in Poland and equal: PT – 0.256, H – 0.490, M – 0.562, Pen org – 0.301, Pen Shut – 0.279, FAO PM – 0.318 and PM – 0.308. Reduction factors for actual evapotranspiration amount to: PT – 0.462, H – 0.872, M – 0.999, Pen org – 0.535, Pen Shut – 0.498, FAO PM – 0.565 and PM – 0.548.

KEY WORDS

transpiration, actual evapotranspiration, potential evapotranspiration, Scots pine

ADDRESSES

Andrzej Boczoń ⁽¹⁾ – e-mail: A.Boczon@ibles.waw.pl
 Andrzej Brandyk ⁽²⁾ – e-mail: Andrzej_Brandyk@sggw.pl
 Michał Wróbel ⁽¹⁾ – e-mail: M.Wrobel@ibles.waw.pl
 Anna Kowalska ⁽¹⁾ – e-mail: A.Kowalska@ibles.waw.pl

⁽¹⁾ Zakład Ekologii Lasu, Instytut Badawczy Leśnictwa; Sękocin Stary, ul. Braci Leśnej 3, 05-090 Raszyn
⁽²⁾ Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, SGGW w Warszawie; ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa

*Artykuł został opracowany na podstawie badań prowadzonych w ramach projektu nr 500 404 finansowanego przez Dyрекcję Generalną Lasów Państwowych.

Wstęp

Parowanie terenowe (ewapotranspiracja) jest jedną z najważniejszych składowych bilansu wodnego, który charakteryzuje się zmiennością w zależności od pokrycia terenu i sposobów jego użytkowania. W przypadku terenów pokrytych roślinnością wysoką na wielkość ewapotranspiracji rzeczywistej największy wpływ wywiera transpiracja, która jest procesem fizjologicznym uzależnionym od warunków klimatycznych, anatomii i morfologii roślin, a także warunków wodno-glebowych. Określenie wielkości transpiracji aktualnej, a w szczególności transpiracji poszczególnych warstw ekosystemu leśnego, jest ważnym zagadnieniem zarówno dla hydrologii zlewni rzecznych, jak i dla gospodarki leśnej.

Rozpoznanie transpiracji drzewostanów i ewapotranspiracji ekosystemów leśnych ma bardzo duże znaczenie w sytuacji prognozowanych zmian klimatu. Przewiduje się, że w środkowej Europie skutkiem tych zmian będzie cieplejsza i bardziej bezdeszczowa pogoda w okresie wegetacji [Degirmendžić i in. 2004; Briffa i in. 2009; Dubrovsky i in. 2009]. Efektem tego będzie częstsze występowanie niedoborów wody w środowisku. W warunkach suszy glebowej będzie dochodziło do ograniczenia dostępności wody glebowej dla roślin, co wpłynie na zmniejszenie transpiracji i fotosyntezy drzewostanów, skutkując z kolei ograniczeniem wzrostu drzew i pogorszeniem ich stanu zdrowotnego. Ze względu na bezpośredni wpływ ocieplania klimatu na elementy parowania terenowego poznanie wielkości transpiracji drzew oraz ewapotranspiracji ekosystemów leśnych jest niezbędne do określenia wpływu zmian klimatu na gospodarkę leśną oraz umożliwia podjęcie wyzwania, przed jakim stoją obecnie leśnicy w środkowej Europie – dostosowania drzewostanów do skutków zmian klimatu.

Rozmiary drzew oraz skomplikowana struktura drzewostanów powodują, że bezpośrednie pomiary transpiracji drzew i ewapotranspiracji rzeczywistej drzewostanów są trudne do zrealizowania. Bezpośrednie pomiary transpiracji pojedynczych drzew bazują obecnie najczęściej na pomiarze przepływu wody w pniach (sap flow) z wykorzystaniem metod cieplnych [Huber 1932; Čermák i in. 1973, 1976; Baker, van Bavel 1987; Granier 1987]. Do poznania ewapotranspiracji rzeczywistej ekosystemów leśnych wykorzystuje się zmiany uwilgotnienia gleby [Marcello i in. 1998] lub metodę kowariancji wirów (eddy covariance) [Wilson i in. 2001]. Metody te umożliwiają określenie wielkości parowania dla badanych obiektów. Pomiar ewapotranspiracji rzeczywistej umożliwia wyznaczenie współczynników redukcyjnych, które pozwalają na określenie ewapotranspiracji rzeczywistej w funkcji ewapotranspiracji potencjalnej. Dzięki temu możliwe jest obliczanie ewapotranspiracji rzeczywistej z danych meteorologicznych.

Celem podjętych badań było określenie rzeczywistych wartości transpiracji typowego dla lasów Polski drzewostanu sosnowego oraz ewapotranspiracji rzeczywistej ekosystemu sosnowego i na ich podstawie wyznaczenie wskaźników redukujących ewapotranspirację potencjalną obliczoną kilkoma metodami (Priestleya-Taylora, Hargreavesa, Makkinka, Penmana, Penmana-Shuttlewortha, FAO Penmana-Monteitha, Penmana-Monteitha).

Materiał i metody

Badania przeprowadzono na powierzchni monitoringu intensywnego lasów Polski funkcjonującej w ramach Programu ICP Forests [de Vries i in. 2003], znajdującej się w odległości około 25 km na południe od centrum Warszawy, na terenie Nadleśnictwa Chojnów. Na powierzchni występuje uboga, piaszczysta gleba Dystric Arenosol [World... 2006] ze zbiorowiskiem roślinnym *Quercus roboris-Pinetum typicum* L. Drzewostan budowany jest przez sosnę pospolitą w wieku 74 lat (w roku 2012) oraz domieszkę brzozy i podrost dębowy. Na powierzchni wykonywane są pomiary

elementów obiegu wody zgodnie z metodyką ICP-Forests [Raspe i in. 2010]. Badaniami objęto wilgotność gleby na głębokościach 10, 25, 50 i 85 cm oraz opad podkoronowy. Określone zostały właściwości retencyjne gleb poprzez wyznaczenie krzywej pF, a także wskaźnik ulistnienia (Leaf Area Index) za pomocą zdjęć hemisferycznych. Przy badanej powierzchni funkcjonuje stacja meteorologiczna mierząca parametry na otwartej przestrzeni.

Transpiracja pojedynczych sosen została określona na podstawie pomiaru sap flow z zastosowaniem aparatury Thermal Dissipation Probe firmy Dynamax Inc. Badaniami objęto trzy sosny o wymiarach pierśnic (DBH) i wysokości (H) odpowiednio: So1 – $DBH=22,5$ cm, $H=19,0$ m; So2 – $DBH=25,3$ cm, $H=20,5$ m; So3 – $DBH=24,3$ cm, $H=20,5$ m. Na podstawie pomierzonej prędkości przepływającej wody w pniu drzew (V) i określonego pola powierzchni przekroju bielu (A_{sw}) oraz pola powierzchni rzutu koron poszczególnych drzew (A_c) obliczono transpirację drzew (TR_{TDP}) w danym przedziale czasu:

$$TR_{TDP} = V \cdot A_{sw} / A_c \text{ [dm}^3/\text{s mm]}$$

Na podstawie pomiarów wilgotności gleby (θ_{TDR}) wykonywanej w trzech profilach na głębokościach 10, 25, 50 i 85 cm określono aktualny zapas wody w glebie (SWS). Zmiany dobowego zapasu wody (ΔSWS) w warunkach $pF 2,0 < \theta_{TDR} < pF 3,7$, opad=0 i $\Delta SWS < 0$ wyznaczają wielkość aktualnej ewapotranspiracji dobowej (EVT_{TDR}).

Dobowa ewapotranspiracja potencjalna (ETP) została wyznaczona siedmioma metodami opartymi na przepływie energii:

Hargreavesa i in. [2003]:

$$ETP = 0,0135 \cdot R_n \cdot conv (T + 17,8)$$

Makkinka [Ermittlung... 1996]:

$$ETP = \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma) \left(0,61 \cdot \frac{R_n}{\lambda} - 0,12 \right)}$$

Priestleya i Taylora [1972]:

$$ETP = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{R_n}{\lambda}$$

Penmana [1948, 1956]:

$$ETP = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{R_n}{\lambda} + \frac{y}{\Delta + \gamma} \cdot f(u) \cdot VPD$$

$$f(u) = 1,313 + 1,381u^2$$

Penmana-Shuttlewortha [Shuttleworth 2007]:

$$ETP = \frac{\frac{\Delta R_n}{\lambda} + \gamma \cdot \frac{6,43 \cdot (1 + 0,536u) VPD}{\lambda}}{\Delta + \gamma}$$

FAO Penmana-Monteitha [Allen i in. 1998] – ewapotranspiracja wskaźnikowa (ET_o):

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta R_n + \gamma \cdot \left(\frac{900}{T + 273} \right) \cdot u VPD}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34u)}$$

Penman-Monteith [Feddes i in. 1997]:

$$\lambda ETP = \frac{\Delta R_n + \rho_a \cdot c_p \frac{VPD}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

gdzie:

- R_n – promieniowanie słoneczne,
- Δ – nachylenie krzywej ciśnienia pary wodnej nasyconej,
- λ – ciepło utajone parowania,
- γ – stała psychrometryczna,
- ρ_a – gęstość powietrza,
- c_p – ciepło właściwe powietrza,
- T – temperatura powietrza,
- VPD – niedosyt wilgotności powietrza,
- u – prędkość wiatru,
- r_a – oporność aerodynamiczna,
- r_s – oporność stomatyczna,
- $conv$ – ekwiwalent konwersji ET ($conv=0,4082 \text{ m}^2 \text{ mm/MJ}$),
- α – parametr Priestley-Taylor ($\alpha=1,26$).

Badania przeprowadzono dla danych pomiarowych z okresu maj-wrzesień 2012 roku. Do analiz wybrano dni spełniające warunki kompletności danych pomiarowych (przepływ wody w pniach, wilgotność gleby, warunki meteorologiczne) oraz dostępności wody glebowej dla roślin i braku odpływu pionowego wody z profilu glebowego – wymagania te są spełnione przy wilgotności gleby w zakresie pF od 2,0 do 3,7 oraz braku opadu, który jest czynnikiem silnie wpływającym na proces pobierania wody przez drzewa [Boczoń 2006].

Współczynniki redukcyjne (K_c) zostały obliczone według wzorów zbliżonych do przedstawionych przez Szajdę [1997] i mają postać:

$$K_c(EVT) = \frac{EVT_{TDR}}{ETP}$$

$$K_c(TR) = \frac{TR_{TDP}}{ETP}$$

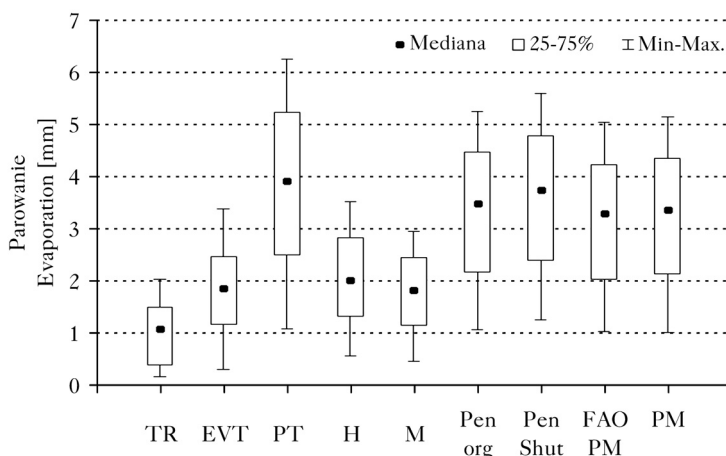
Wartości dobowego parowania terenowego z okresu pełnych lat kalendarzowych charakteryzuje brak rozkładu normalnego, gdyż występuje wyraźna przewaga wartości bliskich zeru, związanych z ewaporacją w półroczu zimowym. Otrzymane dla parowania zbiory wartości pomierzonych oraz obliczonych również nie mają rozkładu normalnego, co zostało zweryfikowane za pomocą testu Shapiro-Wilka. Istotność różnic między wartościami zmierzonymi a obliczonymi ewapotranspiracji potencjalnej, transpiracji i ewapotranspiracji rzeczywistej testowano z zastosowaniem nieparametrycznego testu U Manna-Whitneya. Obliczenia statystyczne wykonano w pakiecie oprogramowania STATISTICA ver. 10.0 (StatSoft, Inc.).

Wyniki

Pomiar przepływu wody w pniach pojedynczych drzew wykazał, że dobową wartość transpiracji w dniach poddanych analizie miała medianę wynoszącą 1,06 mm przy zakresie wartości od 0,13

do 2,02 mm. Dobowa transpiracja drzew stanowiła 56% dobowej ewapotranspiracji rzeczywistej ekosystemu określonej za pomocą różnic zasobów wody glebowej. Mediana dobowej ewapotranspiracji ekosystemu wyniosła 1,85 mm przy zakresie wartości EVT_{TDR} od 0,28 do 3,39 mm (ryc. 1). Obliczone wartości ewapotranspiracji potencjalnej za pomocą siedmiu metod charakteryzowało duże zróżnicowanie. Najwyższe wartości (mediana 3,91 mm) i jednocześnie największy zakres (od 1,07 do 6,27 mm) uzyskano przy zastosowaniu wzoru Priestleya-Taylor. Zbliżone wartości uzyskano przy użyciu wzorów Penmana, Penmana-Monteitha i FAO Penmana-Monteitha – mediany w tych przypadkach uzyskały wartości odpowiednio 3,49, 3,36 i 3,30 mm, zbliżony także był zakres obliczonych wartości ETP . Nieznacznie wyższe wartości dała metoda Penmana-Shuttlewortha (mediana 3,74 mm, zakres od 1,23 do 5,60 mm). Wyniki zdecydowanie odbiegające od pozostałych metod dało zastosowanie wzorów Hargreavesa i Makkinka. Wartości parowania uzyskane tymi metodami były najbardziej zbliżone do wartości uzyskanych metodami pomiarowymi. W przypadku wzoru Hargreavesa mediana osiągnęła wartość 2,00 mm, a ewapotranspiracja występowała w zakresie od 0,55 do 3,52 mm. Zastosowanie wzoru Makkinka skutkowało medianą równą 1,82 mm i zakresem wartości od 0,44 do 2,94 mm (ryc. 1). Testy istotności różnic między wartościami parowania uzyskanymi na podstawie pomiarów i obliczoną ewapotranspiracją potencjalną wykazały, że w przypadku transpiracji drzewostanu (TR_{TDP}) różnice są istotne ($p \leq 0,05$) w przypadku każdego z zastosowanych wzorów obliczeniowych, natomiast w przypadku ewapotranspiracji rzeczywistej (EVT_{TDR}) różnice nie były istotne przy zastosowaniu wzorów Hargreavesa ($p=0,103$) i Makkinka ($p=0,944$) (tab.).

Obliczone współczynniki redukcyjne (Kc) osiągały wartości odwrotnie proporcjonalnie do różnic między zmierzonymi wartościami parowania a obliczoną ewapotranspiracją potencjalną. Najniższe współczynniki redukcyjne zostały obliczone w przypadku metody Priestleya-Taylor: 0,2598 dla transpiracji drzewostanu i 0,4623 dla ewapotranspiracji ekosystemu, a najwyższe współczynniki dla wzoru Makkinka: 0,5618 dla transpiracji drzewostanu i 0,9995 dla ewapotranspiracji ekosystemu (tab.).



Ryc. 1.

Zmierzona transpiracja drzewostanu (TR), ewapotranspiracja rzeczywista na podstawie zmian zasobów wodnych gleb (EVT) i ewapotranspiracja potencjalna obliczona 7 metodami

Measured transpiration (TR), actual evapotranspiration determined based on ground water resources (EVT) and potential evapotranspiration calculated with seven methods

PT – Priestley-Taylor, H – Hargreaves, M – Makkink, Pen org – Penman, Pen Shut – Penman-Shuttleworth, FAO PM – FAO Penman-Monteith, PM – Penman-Monteith

Tabela.

Wartość p testu Manna-Whitneya między wartościami zmierzonymi transpiracji drzewostanu (TR_{TDP}) i ewapotranspiracji ekosystemu sosnowego (EVT_{TDR}) z wartościami ewapotranspiracji potencjalnej (ETP) określonej 7 metodami (A), współczynniki redukcyjne (B) oraz wartość p testu Manna-Whitneya po zastosowaniu współczynników redukcyjnych (C)

P-value in Mann-Whitney test between measured transpiration (TR_{TDP}), Scots pine ecosystem evapotranspiration (EVT_{TDR}) and potential evapotranspiration (ETP) calculated with 7 methods (A), reduction coefficients (B) and p-value in Mann-Whitney test after coefficients were used (C)

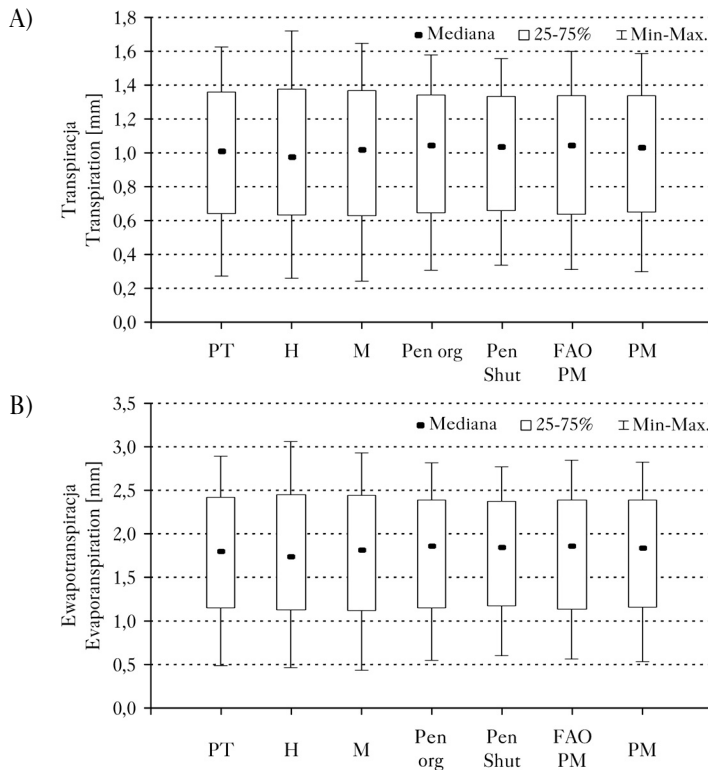
<i>ETP</i>	A		B		C	
	TR_{TDP}	EVT_{TDR}	$Kc(TR)$	$Kc(EVT)$	TR_{TDP}	EVT_{TDR}
PT	0,000	0,000	0,2598	0,4623	0,897	0,991
H	0,000	0,103	0,4902	0,8720	0,923	0,979
M	0,000	0,944	0,5618	0,9995	0,949	0,949
Pen org	0,000	0,000	0,3010	0,5355	0,889	0,996
Pen Shut	0,000	0,000	0,2786	0,4957	0,906	0,957
FAO PM	0,000	0,000	0,3176	0,5649	0,910	0,991
PM	0,000	0,000	0,3083	0,5485	0,897	0,983

PT – Priestley-Taylor, H – Hargreaves, M – Makkink, Pen org – Penman, Pen Shut – Penman-Shuttleworth, FAO PM – FAO Penman-Monteith, PM – Penman-Monteith

Zastosowanie współczynników redukcyjnych umożliwiło obliczenie transpiracji drzewostanu i ewapotranspiracji ekosystemu sosnowego z dużą dokładnością (ryc. 2). Mediana obliczonych wartości transpiracji drzewostanu wahała się w zakresie od 0,98 przy wzorze Hargreavesa do 1,05 mm przy metodzie Penmana. Ponieważ mediany siedmiu metod obliczeniowych były niższe od mediany zmierzonej transpiracji, największą dokładność (przy porównaniu median) miał wzór wykorzystujący metodę Penmana (–1,45%), a najmniejszą Hargreavesa (–8,3%). Zastosowanie współczynników redukcyjnych do obliczenia ewapotranspiracji rzeczywistej ekosystemu dało większą dokładność. Zakres median obliczonych ewapotranspiracji wynosił od 1,75 mm w metodzie Hargreavesa do 1,87 mm w metodzie Penmana. Przy medianie EVT_{TDR} wynoszącej 1,85 mm największą dokładność uzyskano w metodzie Penmana-Shuttlewortha (0,15%), a najmniejszą w metodzie Hargreavesa (–10,5%). Nie stwierdzono istotnych różnic przy zastosowaniu współczynników redukcyjnych przy każdej z metod określania ewapotranspiracji potencjalnej – zarówno przy obliczeniach transpiracji drzewostanu, jak i ewapotranspiracji ekosystemu sosnowego (tab.).

Dyskusja

Transpiracja drzew zależy od wielu czynników, mimo to otrzymane wyniki transpiracji sosen są zbliżone z uzyskiwanymi na terenie środkowej Europy przez innych autorów. Cieniala i in. [2002] badali 70-letnie sosny rosnące w monokulturze na słabych piaszczystych glebach w północnej Szwecji. Autorzy podają, że sosny rosnące wewnątrz lasu transpirowały 70 mm wody w sezonie wegetacyjnym, a sosny rosnące na skraju lasu 107 mm. W badaniach prowadzonych w Belgii [Nadezhkina i in. 2007] dobowy pobór wody przez 72-letnie sosny wynosił maksymalnie do około 1,9 mm. Natomiast w badaniach prowadzonych w Niemczech w trzech obiektach: Neuglobsow (65-letni drzewostan), Taura (45-letni drzewostan) i Rosa (61-letni drzewostan), transpiracja sosen wyniosła odpowiednio 113, 82 i 106 mm w 1994 roku oraz 122, 90 i 94 mm w 1995 roku. Dzienny pobór wody w obiektach Taura i Rosa nie przekraczał 1,0 mm/d, jedynie w obiekcie Neuglobsow był wyższy – na przełomie czerwca i lipca osiągał około 1,5 mm/d [Lüttchwager i in. 1999]. W starszym drzewostanie rosnącym w Belgii zmierzono, że sosny transpirowały maksymalnie 1,85 mm/d, a całkowita transpiracja w okresie maj-listopad wyniosła 176,4 mm, co stanowiło 25% ewapotranspiracji potencjalnej, a łącznie z parowaniem z dolnych



Ryc. 2.

Transpiracja (A) i rzeczywista ewapotranspiracja (B) drzewostanu sosnowego obliczona z zastosowaniem współczynników redukujących (K_c) ewapotranspirację potencjalną określoną 7 metodami

Transpiration (A) and actual evapotranspiration (B) of a Scots pine stand determined from potential evapotranspiration calculated with seven methods using reduction ratios

PT – Priestley-Taylor, H – Hargreaves, M – Makkink, Pen org – Penman, Pen Shut – Penman-Shuttleworth, FAO PM – FAO Penman-Monteith, PM – Penman-Monteith

warstw drzewostanu i gleby ewapotranspiracja rzeczywista stanowiła około 45% ETP [Vincke, Thiry 2008]. Wyższy udział EVT w ETP odnotowano w eksperymencie w Niemczech, gdzie w 1995 roku EVT/ETP w drzewostanie 45-letnim wyniosło 0,52, w drzewostanie 61-letnim 0,51, a w 65-letnim 0,66, z tym że na tej powierzchni panowały znacznie lepsze warunki siedliskowe niż na dwóch pozostałych obiektach [Lüttschwager i in. 1999].

Niewielki udział transpiracji drzewostanu w stosunku do ewapotranspiracji rzeczywistej ekosystemu i ewapotranspiracji potencjalnej wskazuje na stosunkowo niewielkie potrzeby wodne sosen pospolitych. Możliwe, że niewykorzystywanie przez sosny całej dostępnej wody jest jednym z głównych czynników, które umożliwiły temu gatunkowi występowanie w szerokim zakresie siedlisk leńszych: od skrajnie suchych do bagiennych.

Testowanie siedmiu metod obliczenia ewapotranspiracji potencjalnej wykazało, że wzór Makkinka osiąga wartości zbliżone do zmierzonej ewapotranspiracji rzeczywistej ekosystemu sosnowego, czego wyrazem był obliczony współczynnik redukcyjny bliski wartości 1 oraz brak istotności różnic między wartościami obliczonymi i zmierzonymi. Nie ma potrzeby w tym przypadku stosowania współczynnika redukcyjnego, a metodę Makkinka można uznać za odpowiednią do obliczania ewapotranspiracji rzeczywistej ekosystemów leńszych z drzewostanem sosnowych w wieku około 70 lat.

Zastosowane metody obliczania *ETP* można uszeregować pod względem uzyskiwanych wyników – od najniższych do najwyższych: wzór Makkinka < wzór Hargreavesa < wzór FAO Penmana-Monteitha < wzór Penmana-Monteitha < wzór Penmana < wzór Penmana-Shuttlewortha < wzór Priestleya-Taylor. Na świecie stosowanych jest kilkadziesiąt metod obliczania ewapotranspiracji, dlatego trudno znaleźć identyczną grupę wzorów, które byłyby porównywane przez innych autorów. W badaniach prowadzonych w Polsce niższe wartości ewapotranspiracji przy zastosowaniu metody FAO Penmana-Monteitha w porównaniu ze wzorem Penmana otrzymali Kasperska-Wołowicz i Łabędzki [2004] oraz Gąsiorek i in. [2009]. Niższe wartości *ETP* przy stosowaniu wzoru Makkinka w porównaniu z metodą Priestleya-Taylorą otrzymano w badaniach Lu i in. [2005].

Zastosowanie współczynników redukcyjnych do określania parowania rzeczywistego zaproponowali van Wijk i de Vries [1954]. W niniejszej pracy współczynniki redukcyjne można traktować jako wskaźniki roślinne, gdyż został wyeliminowany wpływ warunków wodnych gleb. Najczęściej współczynniki stosowane są do określania *EVT* z ewapotranspiracji wskaźnikowej określonej wzorem FAO Penmana-Monteitha. W przypadku badanego drzewostanu sosnowego współczynnik ten osiągnął wartość 0,3176, a w przypadku ewapotranspiracji ekosystemu 0,5649. Zastosowanie współczynników redukujących *ETP* do *TR* i *EVT* w przypadku każdej z metod obliczania *ETP* dało bardzo dobre wyniki przy porównaniu z wartościami zmierzonymi. Należy jednak zauważyć, że zakres otrzymywanych wyników parowania w każdej z metod obliczeniowych jest znacznie mniejszy od zakresu otrzymanego w drodze pomiarów. Stosowanie współczynników redukcyjnych *ETP* będzie prowadziło do redukcji wartości skrajnych, co może mieć duże znaczenie – szczególnie w przypadku określania wartości maksymalnych, wskazujących na możliwości parowania przez drzewostan lub ekosystem.

Wnioski

- ✦ Zmierzona transpiracja drzewostanu sosnowego stanowiła 56% ewapotranspiracji rzeczywistej.
- ✦ Obliczona za pomocą 7 metod ewapotranspiracja osiągała najbardziej zbliżone wartości do ewapotranspiracji rzeczywistej w przypadku wzorów Hargreavesa i Makkinka, a największe różnice wystąpiły przy zastosowaniu wzoru Priestleya-Taylor.
- ✦ Bardzo duża zgodność i brak statystycznej istotności różnic wyników ewapotranspiracji rzeczywistej określonej na podstawie pomiarów z wynikami obliczeń z wykorzystaniem wzoru Makkinka wskazuje, że wzór ten można stosować do obliczania ewapotranspiracji rzeczywistej ekosystemów leśnych z drzewostanem sosnowych w wieku około 70 lat.
- ✦ Zastosowanie współczynników redukcyjnych do obliczania *TR* i *EVT* z ewapotranspiracji potencjalnej daje dobre rezultaty, jednak może prowadzić do zawężenia zakresu otrzymywanych wyników.

Literatura

- Allen R. G., Pereira L. S., Raer D., Smith M. 1998. Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation & Drainage Paper 56.
- Baker J., van Bavel C. H. M. 1987. Measurement of mass flow of water in the stems of herbaceous plants. Plant Cell Environ. 10: 777-782.
- Boczoń A. 2006. Influence of precipitation on water uptake by trees in moist forest site. W: Boczoń A. [red.]. Assessing of soil and water conditions in forests. 131-140.
- Briffa K. R., van der Schrier G., Jones P. D. 2009. Wet and dry summers in Europe since 1750: evidence of increasing drought. International Journal of Climatology 29: 1894-1905.
- Čermák J., Deml M., Penka M. 1973. A new method of sap flow rate determination in trees. Biol. Plant 15: 171-178.
- Čermák J., Kučera J., Penka M. 1976. Improvement of the method of sap flow rate determination in adult trees based on heat balance with direct electric heating of xylem. Biol. Plant 18: 105-110.

- Cienciala E., Mellander P. E., Kucera J., Oplustilova M., Ottoson-Lofvenius M., Bishop K. 2002. The effect of a north-facing forest edge on tree water use in a boreal Scots pine stand. *Canadian Journal of Forest Research* 32 (1): 693-702.
- Degirmendzić J., Kożuchowski K., Żmudzka E. 2004. Changes of air temperature and precipitation in Poland in the period 1951-2000 and their relationship to atmospheric circulation. *International Journal of Climatology* 24: 291-310.
- Dubrovsky M., Svoboda M. D., Trnka M., Hayes M. J., Wilhite D. A., Zalud Z., Hlavinka P. 2009. Application of relative drought indices in assessing climate change impacts on drought conditions in Czechia. *Theoretical and Applied Climatology* 96: 155-171.
- Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. 1996. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Bonn.
- Feddes R. A., Koopmans R. W. R., van Dam J. C. 1997. *Agrohydrology*. Landbouuniversiteit Wageningen.
- Gąsiorok E., Kamińska J., Musiał E. 2009. Porównanie metody Penmana i Penmana-Monteitha za pomocą rozkładów prawdopodobieństwa ewapotranspiracji wskaźnikowej. *Acta Agrophysica* 13 (2): 341-351.
- Granier A. 1987. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology* 3: 309-320.
- Hargreaves G. H., Allen R. G. 2003. History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 129: 53-63.
- Huber B. 1932. Beobachtung und Messung pflanzlicher Saftströme. *Br. Dtsch. Bot. Ges.* 50: 89-109.
- Kasperska-Wolowicz W., Łabędzki L. 2004. Porównanie ewapotranspiracji wskaźnikowej według Penmana i Penmana-Monteitha w różnych regionach Polski. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie* 11: 123-136.
- Lu J., Sun G., McNulty S. G., Amaty D. M. 2005. A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the Southeastern United States. *Journal Of The American Water Resources Association* 6: 621-633.
- Lüttschwager D., Rust S., Wulf M., Forkert J., Hüttl R. F. 1999. Tree canopy and herb layer transpiration in three Scots pine stands with different stand structures. *Annals of Forest Science* 56: 265-274.
- Marcello M., Katerji N., Rana G., Ben Nouna B. 1998. Daily actual evapotranspiration measured with TDR technique in Mediterranean conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* 90: 81-89.
- Nadezhkina N., Čermák J., Meiresonne L., Ceulemans R. 2007. Transpiration of Scots pine in Flanders growing on soil with irregular substratum. *Forest Ecology and Management* 243 (1): 1-9.
- Penman H. L. 1948. Natural evaporation from open water, bare and grass. *Proc. R. Soc. Lond. A* 193: 120-145.
- Penman H. L. 1956. Evaporation: an introductory survey. *Neth. J. Agric. Sci.* 4: 9-29.
- Priestley C. H. B., Taylor R. J. 1972. On the assessment of surface heat fluxes and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review* 100: 81-92.
- Raspe S., Beuker E., Preuhsler T., Bastrup-Birk A. 2010. *Meteorological Measurements. Manual Part IX. W: Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre, Hamburg.*
- Shuttleworth W. J. 2007. Putting the vap' into evaporation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11 (1): 210-244.
- Szajda J. 1997. *Roślinne i glebowo-wodne wskaźniki ewapotranspiracji na glebie murszowej*. Wydawnictwo IMUZ, Falenty.
- Vincke C., Thiry Y. 2008. Water table is a relevant source for water uptake by a Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stand: Evidences from continuous evapotranspiration and water table. *Agricultural and Forest Meteorology* 148: 1419-1432.
- de Vries W., Reinds G. J., Vel E. 2003. Intensive monitoring of forest ecosystems in Europe 2: Atmospheric deposition and its impacts on soil solution chemistry. *Forest Ecology and Management* 174: 97-115.
- van Wijk W. R., de Vries D. A. 1954. Evapotranspiration. *Neth. J. Agri. Sci.* 2: 105-119.
- Wilson K. B., Hanson P. J., Mulholland P. J., Baldocchi D. D., Wullschlegel S. D. 2001. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance. *Agric. Forest Meteorol.* 106: 153-168.
- World reference base for soil resources. 2006. *World Soil Resources Report* 103.