

**Ryszard OLESZCZUK, Tomasz BRANDYK, Jan SZATYŁOWICZ,  
Tomasz GNATOWSKI, Daniel SZEJBA**

Katedra Kształtowania Środowiska SGGW  
Department of Environmental Improvement WAU

## **Określenie natężenia przepływu wody przez drzewka brzozy na glebie torfowo-murszowej przy zastosowaniu metody „sap-flow”\***

### **Estimation of water flux through the birch trees on peat-moorsh soil using “sap-flow” method**

**Słowa kluczowe:** metoda „sap-flow”, brzoza,  
gleba torfowo-murszowa

**Key words:** “sap-flow” method, birch tree,  
peat-moorsh soil

#### **Wprowadzenie**

Jednym z największych kompleksów gleb torfowych w Polsce są Bagna Biebrzańskie, obejmujące powierzchnię około 100 tys. ha, położone w północno-wschodniej części naszego kraju (Ilnicki 2002). Począwszy od lat siedemdziesiątych XX wieku obserwuje się w Dolinie Biebrzy stopniowe zaniechanie użytkowania łąkowego gleb organicznych, którego konsekwencją jest uruchomienie procesu sukcesji ro-

ślinnej w kierunku zbiorowisk leśnych na dużych powierzchniach torfowisk. Nieużytkowane łąkowo gleby torfowe zarastają wierzbą, drzewkami brzozy oraz trzciną. Zaniechanie koszenia łąk na torfowiskach grozi opanowaniem dużych ich powierzchni głównie przez lasy brzozowe, co w konsekwencji prowadzić może do zmniejszenia zróżnicowania zbiorowisk roślinnych i utraty siedlisk przez wiele gatunków fauny. Należy podkreślić, że w chwili obecnej zbiorowiska leśne i zaroślowe występują na obszarze około 25% ogólnej powierzchni doliny rzeki Biebrzy (Bartoszek i in. 2004). Leśne wykorzystanie torfowisk, z uwagi na wysokie potrzeby wodne drzew liściastych, prowadzi

---

\* Badania, których wyniki przedstawiono w niniejszej pracy sfinansowane były z grantu uczelnianego JM Rektora SGGW w 2004 roku (nr projektu: 504 05270012).

również do szybszej degradacji gleb torfowych. Analizując stosunki wodne w zależności od sposobu użytkowania tych gleb jako pola orne, łąki i lasy stwierdzono, że największe przesuszenie wierzchnich warstw gleby zachodzi pod lasem brzozy. Występuje ono szczególnie w latach suchych, w których wilgotność wierzchnich warstw gleby może utrzymywać się przez dłuższy czas w przedziale wody niedostępnej lub trudno dostępnej dla roślin (Gotkiewicz i Szuniewicz 1987). Wysychanie gleby może powodować znaczne rozluźnienie struktury, wzrost aeracji i przepuszczalności jej wierzchnich warstw, co w konsekwencji przyczyniać się może do pogorszenia właściwości retencyjnych i przyspieszenia tempa przemian substancji organicznej w porównaniu z łąkowym użytkowaniem tych gleb (Gotkiewicz i in. 1983). Powyższe procesy zachodzące w glebach torfowych powodują ich osiadanie i nadmierną mineralizację. W konsekwencji prowadzi to do ich degradacji, a następnie do całkowitego zanikania. Na podstawie dotychczasowych wyników badań stwierdzono, że występująca często na torfowiskach brzoza (*Betula L.*) jest gatunkiem silnie transpirującym. W przypadku dojrzałego drzewa brzozy wielkość transpiracji może dochodzić nawet do 400 kg wody w ciągu doby, a prędkość przewodzenia wody może osiągać  $1-5 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$  (Brzozy 1979). Należy podkreślić, że w dostępnej literaturze brak jest informacji dotyczących wielkości poboru wody przez drzewka brzozy rosnące na glebach torfowo-murszowych. Natomiast wielkość poboru wody przez krzewy wierzby, które towarzyszą brzozie podczas sukcesji,

była przedmiotem wielu badań opublikowanych w literaturze (Cienciala i Lindroth 1995, Lindroth i in. 1995, Nagler i in. 2003). Z analizy tych prac wynika, że maksymalny pobór wody przez krzewy wierzby o średnicy pnia od 15 mm do 30 mm wynosi około 4 kg wody na dobę. Istnieje zatem potrzeba dokładnego zbadania procesu poboru wody przez drzewka brzozy, które ma znaczenie strategiczne dla racjonalnego gospodarowania wodą. Rozpoznanie tego procesu jest niezbędne zarówno do oceny wymagań wodnych drzewek brzozy, jak również do utrzymywania odpowiedniego uwilgotnienia gleb torfowo-murszowych, zapobiegającego nadmiernej ich degradacji.

Celem niniejszej pracy jest ocena wielkości przepływu wody w cyklu dobowym przez drzewka brzozy rosnące na glebie torfowo-murszowej, przy wykorzystaniu metody „sap-flow” dla wybranego stanowiska w dolinie rzeki Biebrzy.

### **Charakterystyka metody „sap-flow”**

Pomiar transpiracji pojedynczego drzewa może być określony przy zastosowaniu kilku różnych grup metod (Boczoń 2004), z których do najważniejszych zaliczyć można:

- metody lizymetryczne, wykorzystujące pomiary zmian zawartości wody w lizymetrze glebowym z rosnącym drzewem,
- metody przybliżone, określające transpirację drzewa na podstawie masy uciętych pojedynczych liści lub gałązek,

- metody porometryczne, polegające na umieszczeniu małego drzewka w zamkniętym pojemniku, w którym przeprowadza się pomiar wilgotności powietrza,
- metody oparte na pomiarze prędkości wody przepływającej w pniu drzewa.

Do metod opartych na pomiarze prędkości przepływu wody w pniu drzewa możemy zaliczyć m.in. metody termiczne, które polegają na dostarczeniu pojedynczego lub długotrwałego impulsu cieplnego do łodygi lub pnia drzewa i pomiarze temperatury soku roślinnego w niewielkiej odległości ponad ogrzaną sferą pnia (Kucera i in. 1977, Miller i in. 1980, Lagergren i Lindroth 2004, Cermak i in. 2004). Wzrost temperatury płynącego soku roślinnego stanowi następnie podstawę do obliczenia prędkości przepływu wody (Baker i van Bavel 1987). Metoda termiczna (impulsu cieplnego) ma wiele zalet, z których najważniejsze to: niedestruktywność, powtarzalność i możliwość częstego wykonywania pomiarów, ze względu na wymaganie jedynie niewielkiego przedziału czasu między kolejnymi pomiarami. Zaburzenia w przepływie soku roślinnego obserwowane przy zastosowaniu tej metody umożliwiają również wykrywanie różnego rodzaju nieprawidłowości w procesach fizjologicznych roślin, takich jak uszkodzenia systemu korzeniowego lub różnego rodzaju choroby.

W niniejszej pracy do pomiaru przepływu wody w drzewie zastosowano zestaw „Sap Flow System” firmy Delta-T typ SF1-4DL2. W skład zestawu, oprócz sond pomiarowych umieszczonych na pniu lub łodydze drzewa,

wchodzi również akumulator służący do zasilania ich podgrzewacza oraz rejestrator umożliwiający zachowywanie i przesyłanie danych pomiarowych. Zastosowane sondy pomiarowe składają się z podgrzewacza (grzałki) znajdującego się między dwiema termoparami wbudowanymi w opaskę cylindryczną z materiału izolacyjnego. Podgrzewacz dostarcza długotrwały impuls cieplny do pnia lub łodygi, powodując wzrost temperatury przepływającego soku roślinnego, który mierzony jest za pomocą termopar. Metoda impulsu cieplnego wymaga ustalonych warunków przepływu ciepła i stałej wartości dostarczonej energii cieplnej do rozpatrywanego fragmentu pnia lub łodygi. W związku z tym rozpatrywany fragment ogrzewanej części pnia (łodygi) musi być izolowany od otaczającego środowiska, co zapewnia konstrukcja sondy pomiarowej. Schemat fragmentu pnia rośliny z umieszczoną sondą pomiarową oraz poszczególne składowe bilansu cieplnego sferycznie ogrzewanego pnia przedstawiono na rysunku 1. Równanie bilansu cieplnego ogrzewanego pnia można przedstawić w następującej formie (Baker i van Bavel 1987):

$$P_{in} = Q_r + Q_v + Q_f \quad (1)$$

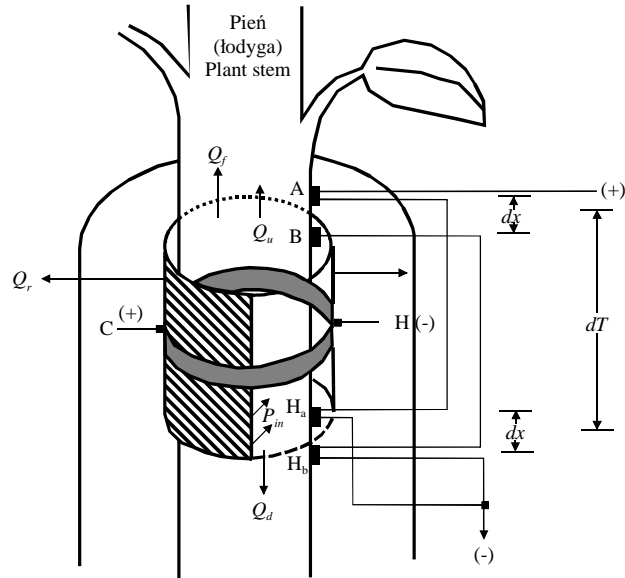
gdzie:

$P_{in}$  – ilość ciepła dostarczona przez podgrzewacz do pnia [W],

$Q_r$  – radialne straty ciepła przenoszone do otoczenia [W],

$Q_v$  – ilość ciepła rozchodząca się w pniu w kierunku pionowym [W],

$Q_f$  – ilość ciepła transportowana przez sok roślinny [W].



RYSUNEK 1. Schemat bilansu cieplnego pnia w zastosowaniu w metodzie „sap-flow” (objaśnienia symboli w tekście) (Baker i van Bavel 1987)

FIGURE 1. Scheme of heat balance of the plant stem used in “sap-flow” method (symbol description in the text) (Baker and van Bavel 1987)

Ilość ciepła rozchodzącą się pionowo ( $Q_v$ ) jest sumą następujących składowych:

$$Q_v = Q_u + Q_d \quad (2)$$

gdzie:

$Q_u$  – pionowy impuls ciepła rozchodzący się ku górze [W],

$Q_d$  – pionowy impuls ciepła rozchodzący się ku dołowi [W].

Wartości poszczególnych składowych pionowych impulsu ciepła występujące w równaniu (2) mogą być określone w następujący sposób:

$$Q_u = K_{st} A \frac{dT_u}{dx}$$

$$Q_d = K_{st} A \frac{dT_d}{dx} \quad (3)$$

gdzie:

$K_{st}$  – współczynnik przewodnictwa cieplnego pnia (łodygi) [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ],

$A$  – pole przekroju poprzecznego pnia (łodygi) [ $m^2$ ],

$dT_u/dx$ ;  $dT_d/dx$  – gradienty temperatury odpowiednio w kierunku ku górze i dołowi [ $K \cdot m^{-1}$ ],

$dx$  – odległość między czujnikami poszczególnych termopar [m].

Współczynnik przewodnictwa cieplnego ( $K_{st}$ ), zgodnie z propozycją Bakera i van Bavela (1987), przyjmuje następujące wartości: 0,42 dla pnia drzewa, 0,54 dla łodygi roślin zielnych i 0,28 dla łodygi roślin naczyniowych.

W skład zainstalowanej na pniu (łodydze) sondy pomiarowej wchodzi 2 termopary położone na różnych wysokościach, z których każda wyposażona jest w dwa czujniki mierzące wzrost

temperatury soku roślinnego na określonej wysokości. W przypadku pierwszej termopary odbywa się to na odległości  $A-H_a$ , natomiast druga termopara mierzy różnicę temperatury na odległości  $B-H_b$  (rys. 1). Po porównaniu odczytów z poszczególnych termopar i przy założeniu, że wartość  $dx$  jest stała dla poszczególnych termopar, wartość pionowo rozchodzącego się impulsu cieplnego ( $Q_v$ ) można wyrazić za pomocą następującej formuły:

$$Q_v = 0,040 K_{st} A \frac{BH - AH}{dx} \quad (4)$$

gdzie 0,040 to współczynnik umożliwiający przeliczenie sygnałów z termopar pomierzonych w mV na wartość temperatury wyrażoną w °C [ $\text{mV} \cdot \text{°C}^{-1}$ ].

Radialna strata ciepła ( $Q_r$ ) z sondy pomiarowej umieszczonej na pniu (łodydze) może być wyliczona z następującej zależności:

$$Q_r = K_{sh} CH \quad (5)$$

gdzie:

$K_{sh}$  – przewodnictwo termiczne sondy pomiarowej [ $\text{W} \cdot \text{mV}^{-1}$ ],

CH – współczynnik proporcjonalny do różnicy temperatury w środku i na zewnątrz sondy pomiarowej [mV].

Dysponując pomiarem wartości składowych bilansu cieplnego ( $P_{in}$ ,  $Q_u$ ,  $Q_d$  i  $Q_r$ ), zgodnie z równaniem (1) oblicza się ilość ciepła transportowanego wraz z sokiem roślinnym ( $Q_p$ ), która następnie stanowi podstawę do obliczenia masy przepływającego w pniu (łodydze) soku roślinnego z następującego wzoru:

$$F = \frac{P_{in} - Q_r - Q_u - Q_d}{C_p - dT} \quad (6)$$

gdzie:

$F$  – masa przepływającego soku roślinnego (wody) w pniu (łodydze) [ $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$ ],

$C_p$  – ciepło właściwe wody,  $C_p = 4,186 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ ,

$dT$  – wzrost temperatury soku roślinnego [°C].

## Materiał i metodyka badań

Badania dotyczące określenia wielkości przepływu wody w pniach brzozy przeprowadzono dla drzewek rosnących na glebie torfowo-murszowej (MtIIcb) wytworzonej z torfu turzycowiskowego i położonej na kwaterze 45, należącej do Zakładu Doświadczalnego IMUZ w Biebrzy (Gotkiewicz i Gotkiewicz 1979). Do badań wytypowano trzy brzozy brodawkowate (*Betula pendula*) o podobnym stanie ulistnienia, wieku i wysokości wynoszącej około 2,5 m. Drzewka charakteryzowały się następującymi średnicami dolnej części pnia: 13,3, 13,5 i 13,6 mm. Następnie na dolnej części pnia każdej z nich zainstalowano sondę pomiarową. Każda sonda połączona była kablem z urządzeniem rejestrującym. Pomiary wielkości przepływu wody przez brzozy przeprowadzono w okresie od 3 do 7 października 2004 roku, z częstotliwością co 30 minut. W celu pomiaru parametrów meteorologicznych, na sąsiedniej kwaterze 17, zainstalowano automatyczną stację meteorologiczną firmy Skye, która rejestrowała godzinowe wartości promieniowania całkowitego, opadu atmosferycznego, temperatury i wilgotności względnej powietrza.

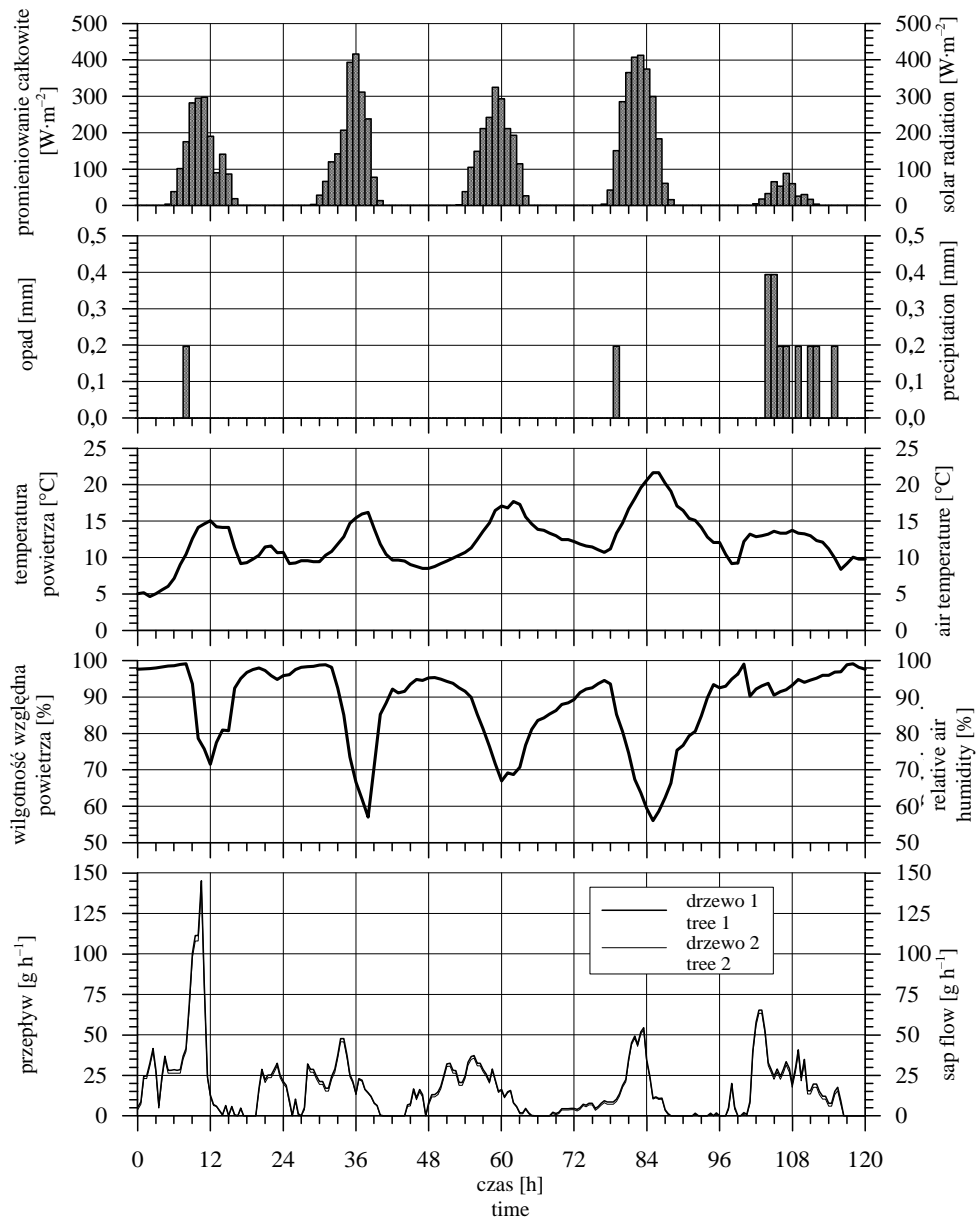
## Wyniki pomiarów

Wyniki pomiarów natężenia promieniowania słonecznego, wielkości opadu, temperatury i wilgotności względnej powietrza oraz wielkości przepływu wody w dwóch drzewkach brzozy w poszczególnych godzinach okresu pomiarowego przedstawiono na rysunku 2. W analizie wykorzystano tylko pomiary przepływu z dwóch sond pomiarowych, ponieważ w rozpatrywanym okresie trzecia sonda uległa awarii. Z przedstawionych danych pomiarowych obejmujących łącznie 120 godzin wynika, że wielkości przepływu wody podczas całego okresu w rozpatrywanych drzewkach były bardzo zbliżone do siebie. Analizując wielkości przepływu wody (rys. 2) stwierdzono, że maksymalna wartość wynosząca około  $140 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$ , wystąpiła w okresie pierwszej doby w godzinach przedpołudniowych. Następnie obserwowano szybki spadek wartości przepływu aż do jego kompletnego zaniku w godzinach wieczornych. Kolejne pojawienie się przepływu wody zaobserwowano w późnych godzinach nocnych, które wykazywało tendencję do stopniowego wzrostu w godzinach porannych. Podobny przebieg cyklu poboru wody przez drzewka brzozy obserwowany był również w pozostałych dniach, chociaż wartości przepływu maksymalnego w godzinach przedpołudniowych były znacznie niższe i mieściły się w przedziale od około 40 do  $70 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$ .

Analizując wpływ poszczególnych czynników meteorologicznych na wielkość przepływu wody przez drzewka brzozy, można stwierdzić, że wielkość promieniowania całkowitego nie ma

znaczącego wpływu na przebieg powyższego procesu. Rozpatrując wpływ wielkości opadu na wielkość przepływu, stwierdzono, że wystąpienie opadu powoduje zmniejszenie wielkości przepływu. Jest to szczególnie widoczne w ciągu ostatniej doby, w której przy relatywnie największych wartościach opadu w okresie badań zaobserwowano redukcję wielkości przepływu. Wzrost temperatury powietrza przy jednoczesnym spadku wartości jego wilgotności względnej powodował wzrost wielkości przepływu wody w rozpatrywanych drzewkach.

W tabeli 1 zestawiono pomierzone dobowe wartości natężenia promieniowania całkowitego, sumy opadu, średnią sumę przepływu wody dla dwóch drzewek oraz średnie wartości wilgotności względnej i temperatury powietrza dla rozpatrywanego okresu i stowiska w Dolinie Biebrzy. Z przedstawionych danych wynika, że średnie dobowe wartości natężenia promieniowania całkowitego dla poszczególnych dni były zbliżone do siebie, jedynie w ciągu ostatniej doby zaobserwowano znaczny ich spadek. Sumy dobowe opadów atmosferycznych w rozpatrywanym okresie były stosunkowo małe, osiągając maksymalną wartość około 2 mm w ostatnim dniu pomiarów. Średnia temperatura powietrza w poszczególnych dobach wahała się w przedziale od 10 do  $15,4^{\circ}\text{C}$ , natomiast średnia wilgotność względna powietrza wynosiła około 88%. Dobowe sumy przepływu wody w drzewkach brzozy zmieniały się w przedziale od 657 do 267 g na dobę, przy czym maksymalną wartość zaobserwowano podczas pierwszej doby, a minimalną w ciągu czwartej doby rozpatrywanego okresu.



RYSUNEK 2. Przebieg pomierzonych wartości promieniowania całkowitego, opadów, temperatury i wilgotności względnej powietrza oraz przepływu wody w pniach drzewek brzoź  
 FIGURE 2. Measured values of solar radiation, precipitation, air temperature, relative air humidity and water fluxes through the birch trees

TABELA 1. Pomierzone dobowe wartości natężenia promieniowania całkowitego, sumy opadów i przepływu wody w pniu drzewek brzoź oraz średnie wartości wilgotności względnej i temperatury powietrza

TABLE 1. Measured daily values of solar radiation, sums of precipitation and water fluxes through birch trees and average values of relative air humidity and air temperature

Data Date	Promieniowanie całkowite Solar radiation [MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ]	Suma opadów Sums of precipi- tation [mm]	Średnia tempe- ratura powietrza Average air temperature [°C]	Średnia wilgot- ność względna powietrza Average relative air humidity [%]	Sumaryczny przepływ wody Cumulative water flux [g]
2004.10.03	6,201	0,197	10,0	92,1	656,8
2004.10.04	7,270	0,000	11,1	88,3	344,7
2004.10.05	6,892	0,000	13,1	83,8	336,5
2004.10.06	9,377	0,197	15,4	79,2	267,4
2004.10.07	1,449	1,970	11,6	94,9	417,2

## Podsumowanie i wnioski

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań stwierdzono, że metoda „sap-flow” umożliwia w sposób niedostrukturywny, ciągły i dokładny pomiar procesu przepływu wody w pniu drzewek brzozy. Analiza wyników badań przepływu wody na tle wybranych czynników meteorologicznych wskazuje na przydatność tej metody do badania zużycia wody przez drzewka brzożowe na glebie torfowo-murszowej. Analizując wielkość przepływu wody w drzewkach brzożowych o średnicy pnia od 13,3 do 13,6 mm i wysokości około 2,5 m, rosnących na glebie torfowo-murszowej Młłcb w Dolinie Biebrzy, rozpoznano dobowy cykl przepływu wody. W cyklu tym maksymalna wielkość przepływu występowała w godzinach przedpołudniowych, następnie obserwowano szybki jego spadek aż do kompletnego zaniku w godzinach wieczornych. Kolejne pojawienie się przepływu wody obserwowano w późnych godzinach nocnych, które

następnie stopniowo wzrastało w godzinach porannych. Maksymalne godzinowe wielkości przepływu wody wahały się w granicach od około 40 g do około 140 g. Przedstawione wyniki pomiarów przepływu wody przez drzewka brzozy dotyczą okresu od 3 do 7 października 2004 roku i ze względu na krótki okres prowadzonych obserwacji, w celu potwierdzenia uzyskanych w powyższej pracy wyników pomiarów wielkości przepływu, należałoby przeprowadzić w przyszłości badania sprawdzające na tym samym obiekcie.

## Literatura

- BAKER J.M., van BAVEL C.H.M. 1987: Measurement of mass flow of water in stems of herbaceous plants. *Plant, Cell and Environment* 10: 777–782.
- BARTOSZUK H., DEMBEK W., DOBRZYŃSKA N., MARCZAKIEWICZ P., KOŁOMYJSKA I., MACIEJCZAK M., BOŁTROMIUK A. 2004: Perspektywy wdrażania programów rolnośrodowiskowych w Polsce na przykładzie Doliny Biebrzy. WWF Polska, Warszawa.



- BOCZOŃ A. 2004: Zużycie wody przez dęby w siedlisku lasu wilgotnego. Monografie Kom. Gosp. Wodnej PAN, z. 23, Warszawa.
- Brzozy (*Betula L.*) 1979. Inst. Dendrologii PAN. T. 7, PWN, Warszawa.
- CENCIALA E., LINDROTH A. 1995: Gas-exchange and sap flow measurements of willow trees in short-rotation forest. I. Transpiration and sap flow. *Trees* 9: 289–294.
- CERMAK J., KUCERA J., NADEZHINA N. 2004: Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands. *Trees* 18: 529–546.
- GOTKIEWICZ J., GOTKIEWICZ M. 1979: Wyniki wieloletniego doświadczenia agrotechnicznego: wpływ sposobu użytkowania na urodzajność gleb torfowych 1964–1976. *Bibl. Wiad. IMUZ* 59: 115–165.
- GOTKIEWICZ J., SZUNIEWICZ J. 1987: Kształtowanie się stosunków powietrzno-wodnych w wierzchniej warstwie gleb torfowo-murszowych wieloletnich doświadczeń. *Bibl. Wiad. IMUZ* 68: 43–55.
- GOTKIEWICZ J., SZUNIEWICZ J., KOWALCZYK Z., SZYMANOWSKI M. 1983: Przeobrażanie się odwodnionych gleb torfowych w lasach brzozowych basenu Środkowego Biebrzy. *Zesz. Prob. Post. Nauk Rol.* 255: 153–170.
- ILNICKI P. 2002: Torfowiska i torf. Wydaw. Akad. Rol. im. Augusta Cieszkowskiego w Poznaniu, Poznań.
- KUCERA J., CERMAK J., PENKA M. 1977: Improved thermal method of continual recording the transpiration flow rate dynamics. *Biologia Plantarum* 19(6): 413–420.
- LAGERGREN F., LINDROTH A. 2004: Variation in sapflow and stem growth in relation to tree size, competition and thinning in a mixed forest of pine and spruce in Sweden. *Forest Ecology and Management* 188: 51–63.
- LINDROTH A., CERMAK J., KUCERA J., CIENCIALA E., ECKERSTEN H. 1995: Sap flow by the heat balance method applied to small size *salix* trees in a short-rotation forest. *Biomass and Bioenergy* 8: 7–15.
- MILLER D.R., VAVRINA C.A., CHRISTENSEN T.W. 1980: Measurement of sap flow and transpiration in ring-porous oaks using a heat pulse velocity technique. *Forest Sci.* 26: 485–494.
- NAGLER P., GLENN E.P., THOMPSON T.L. 2003: Comparison of transpiration rates among saltcedar, cottonwood and willow trees by sap flow and canopy temperature methods. *Agricult. and Forest Meteorol.* 116: 73–89.

## Summary

**Estimation of water flux through the birch trees on peat-moorsh soil using “sap-flow” method.** The analysis of the results of the performed research confirmed, that the “sap flow” method is appropriate for continuous, non-destructive and accurate measurements of the water flow process through the birch trees. The analysis of the water flow through the birch trees trunks of the diameter ranging from 13.3 mm to 13.6 mm and the height of the trees about 2.5 m growing on peat-moorsh soil (MtlIcb) in Biebrza valley allowed the recognition of its daily cycle. The maximum water flux in daily cycle was observed during forenoon hours and than the rapid decrease (up to complete disappearance) of water flux was observed. After that the water flux started to increase again during the late night hours and than continued gradual increase during the morning hours. The maximum hourly values of measured water flow were in the range from about 40 g to about 140 g. The presented results of the water flux through birch trees were measured during the period from 3<sup>th</sup> to 7<sup>th</sup> of October 2004. It is necessary to repeat the measurements of water flow through the same birch trees in the future because the period of measurements was relatively short and represented the end of vegetation period.

### Authors' address:

Ryszard Oleszczuk, Tomasz Brandyk, Jan Szatyłowicz, Tomasz Gnatowski, Daniel Szejba  
 Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
 Katedra Kształtowania Środowiska  
 ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa  
 Poland



