

**Małgorzata KLENIEWSKA<sup>1</sup>, Dariusz GOŁASZEWSKI<sup>1</sup>,  
Grzegorz MAJEWSKI<sup>1</sup>, Paweł SIEDLECKI<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Zakład Meteorologii i Klimatologii SGGW w Warszawie

Division of Meteorology and Climatology Warsaw University of Life Sciences – SGGW

<sup>2</sup>Katedra Agrometeorologii Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu

Department of Agrometeorology Poznań University of Life Sciences

## **System pomiaru głównych składników bilansu cieplnego łąki bagiennej w dolinie dolnej Biebrzy Measurement system of heat balance elements in marsh grassland in the river Biebrza lower basin**

**Słowa kluczowe:** bilans cieplny, dolina Biebrzy, metoda kowariancji wirów

**Key words:** heat balance, Biebrza valley, eddy covariance method

### **Wprowadzenie**

Z ogólnej ilości energii, jaka dociera do powierzchni czynnej, zwykle największa (w warunkach dostępności wody) jest zużywana na parowanie, a pozostała część na ogrzanie atmosfery i gleby. Dokładne rozpoznanie struktury bilansu cieplnego ekosystemów, który przez proces parowania związany jest z bilansem wodnym, stanowi podstawę rozumienia ich funkcjonowania. Zagadnienia wymiany masy i energii między powierzchnią czynną a atmosferą są przedmiotem badań wielu naukowców. W Polsce wyniki badań nad strukturą

bilansu cieplnego powierzchni czynnej można znaleźć m.in. w pracach: Paszyńskiego (1972, 1979), Paszyńskiego i innych (1999), Kędziory (1994), Olejnika (1988, 1996) – są to prace dotyczące przede wszystkim obszarów rolniczych, natomiast zagadnienia bilansu cieplnego obszarów zurbanizowanych przedstawiono w pracach Fortuniaka i innych (2001) i Fortuniaka (2003).

Szczególnie cennymi, ze względu na wartości ekologiczne, ekosystemami są tereny podmokłe, które stanowią także olbrzymi rezerwar wodny na Ziemi. Cennym, w dużym stopniu naturalnym kompleksem torfowo-bagiennym w Polsce jest dolina Biebrzy, objęta statusem parku narodowego. Jest miejscem występowania rzadkich, często zagrożonych gatunków roślin i zwierząt – w 1995 roku dolina Biebrzy została wpisana na listę siedlisk konwencji ramsar-

skiej. Na obszarze tym obserwowane są niekorzystne przekształcenia pokrycia roślinnego (Mioduszewski i in. 2004) – najbardziej widoczna jest sukcesja szaty roślinnej, prowadząca do zwiększenia udziału zakrzaczeń, i trzciny – spowodowana zaprzestaniem koszenia i wypasania łąk bagiennych (Okruszko i in. 2003). Zmiany w szacie roślinnej mogą również wynikać ze zmian uwilgotnienia siedlisk hydrogenicznych (Okruszko i in. 2003, Mioduszewski i in. 2004). Ochrona doliny związana jest m.in. z utrzymaniem wysokich stanów wód powierzchniowych i gruntowych, niezbędnych do zapewnienia odpowiedniego uwilgotnienia gleb bagiennych i niedopuszczenia do przesuszenia torfów i ich degradacji (Mioduszewski i in. 2004). Wymaga to wdrażania odpowiednich zasad gospodarowania wodą.

Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie systemu pomiarowego oraz metodyki rozpoczętych właśnie badań nad rozpoznaniem struktury bilansu cieplnego powierzchni ekosystemów łąkowych w dolinie dolnej Biebrzy. Podjęcie takich badań jest związane z istniejącą potrzebą rozpoznania warunków energetycznych powierzchni czynnej tego obszaru. Szczególnie cenne w tym przypadku są wyniki badań dotyczące strumienia ciepła utajonego, który to składnik jest częścią wspólną bilansu cieplnego i wodnego i nie jest tu jeszcze dobrze rozpoznany (Byczkowski i Fal 2004). Uzyskane wyniki można wykorzystać w różnych badaniach uwzględniających ewapotranspirację, na przykład modelowych, dotyczących zagadnień gospodarowania wodą.

Automatyczny system pomiarowy został zaprojektowany i wykonany w Zakładzie Meteorologii i Klimatologii SGGW w Warszawie.

Jako miejsce badań wyznaczono teren Bagna Ławki, leżący w dolinie dolnej Biebrzy w granicach Biebrzańskiego Parku Narodowego. Od wschodu do zachodu między wysoczyznami rozciąga się dolinowe, płaskie torfowisko o szerokości dochodzącej do 13 km. Jest to prawdopodobnie najszerszy zwarty kompleks torfowiskowy w dolinie rzeki nizinnej w Polsce (Dembek 2000, za: Okruszko i in. 2003). Miąższość złóż torfu w basenie dolnej Biebrzy dochodzi do 1,5 m, lokalnie przekracza 2 m (Dembek i in. 2005). W dużym stopniu warunki siedliskowe w dolinie dolnej Biebrzy kształtowane są przez wody podziemne dopływające od północy z obszaru basenu środkowej Biebrzy i od wschodu z wysoczyzn (Okruszko i in. 2003).

W bogatej bibliografii Biebrzańskiego Parku Narodowego niewiele publikacji dotyczy klimatu tego obszaru. Charakterystyka warunków klimatycznych Kotliny Biebrzańskiej, oparta na standardowych pomiarach meteorologicznych zawarta jest w publikacjach Kosowskiej-Cezak z zespołem (1991) oraz Górniaka (2004).

Ogromna powierzchnia bagna oraz jej jednorodność jest szczególnie istotna z punktu widzenia prowadzonych badań nad wymianą masy i energii pomiędzy podłożem a atmosferą – pomiary takie wymagają bowiem stosunkowo dużych, płaskich i homogenicznych powierzchni.

Praca ta jest finansowana ze środków na naukę w latach 2008–2010 jako projekt badawczy.

## Material i metoda

Podstawą realizacji założonego celu projektu są pomiary wartości głównych składników bilansu cieplnego powierzchni czynnej, opisanego równaniem:

$$R_n + E + S + G = 0, \quad (1)$$

gdzie:

$R_n$  – saldo promieniowania,

$E$  – turbulencyjny strumień ciepła utajonego,

$S$  – turbulencyjny strumienia ciepła jawnego,

$G$  – strumień ciepła w glebie.

Z 4 głównych składników bilansu cieplnego strumienie promieniowania (lub ich sumę algebraiczną, stanowiącą saldo promieniowania) można stosunkowo łatwo i dokładnie wyznaczyć za pomocą bezpośrednich pomiarów; również z dużą dokładnością można wyznaczyć strumień ciepła w glebie. Największe trudności sprawia wyznaczenie strumieni ciepła jawnego i utajonego. Można tu wykorzystać metody pośrednie lub – obecnie jedyną – bezpośrednią metodę kowariancji wirów.

Autorzy opracowali system umożliwiający pomiary bądź też wyznaczenie wartości poszczególnych strumieni bilansu. Pierwsze pomiary przeprowadzono w okresie od 11 do 24 sierpnia 2008 roku.

Saldo promieniowania ( $R_n$ ) mierzą saldometrem NR LITE firmy Kipp & Zonen (rys. 1). Przyrząd wyposażony jest w 2 powierzchnie absorbujące – górna mierzy natężenie promieniowania słonecznego całkowitego oraz promieniowania zwrotnego atmosfery, natomiast dolna mierzy natężenie promieniowania słonecznego odbitego oraz promieniowania Ziemi. Powierzchnie absorbujące pod wpływem promieniowania zmieniają temperaturę, a różnica temperatury na termostosie wywołuje w nim napięcie proporcjonalne do salda promieniowania powierzchni czynnej. Czujnik umieszczono na wysokości 1,5 m nad roślinnością.

Pomiar gęstości strumienia ciepła jawnego ( $S$ ) wykonano metodą kowariancji wirów. Pozwala ona na bezpośredni pomiar strumieni masy i energii wymienianych między szatą roślinną



RYSUNEK 1. Saldometr Kipp & Zonen  
FIGURE 1. Net Radiometer Kipp & Zonen

a atmosferą, w różnych okresach, nad względnie dużymi obszarami, bez naruszania warstwy roślinności (Baldocchi i in. 2001). Badania składników bilansu cieplnego powierzchni czynnej z wykorzystaniem metody kowariancji wirów rozwijają się w świecie od lat pięćdziesiątych ubiegłego stulecia, natomiast pomiary ciągle podjęto 20 lat temu na Harvard University. Od tego czasu technika EC jest intensywnie wdrażana, a rozwój informatyki i miniaturyzacji metod spektroskopowych umożliwiły wykorzystanie metody do pomiarów masy i energii (Urbaniak 2006). Metoda kowariancji wirów była w ostatnich latach wykorzystywana przez wielu badaczy zajmujących się wymianą dwutlenku węgla czy bilansem cieplnym różnych powierzchni czynnych, na przykład: lasu (Baldocchi i Meyers 1991, Black i in. 1996), pól uprawnych (Józefczyk 2005, Pawlak i in. 2005, Urbaniak 2006), obszarów trawiastych (Pawlak i in. 2007) czy zurbanizowanych (Fortuniak i in. 2001, Fortuniak 2003).

Zastosowanie metody jest ograniczone do czasu, kiedy warunki atmosferyczne są mało zmienne, oraz do miejsc o stosunkowo płaskim terenie (Baldocchi i in. 2001).

Podstawą teoretyczną metody jest równanie (Swinbank 1951):

$$F = \overline{w\rho} \quad (2)$$

gdzie:

$F$  – gęstość strumienia wielkości skalarnej,  
 $w$  – składowa pionowa prędkości wiatru,  
 $\rho$  – gęstość transportowanej substancji.

Równanie to opisuje średni strumień dowolnej wielkości skalarnej jako iloczyn pionowej składowej prędkości wiatru i gęstości przenoszonej substancji.

W celu praktycznego obliczenia strumieni przeprowadza się dekompozycję Reynoldsa – chwilową wartość wielkości zmieniającej się w czasie, na przykład składowej pionowej ruchu powietrza ( $w$ ), rozkładamy na sumę jej wartości średniej w czasie ( $\bar{w}$ ) i fluktuacji, czyli chwilowego odchylenia od tej średniej ( $w'$ ). Możemy dokonać więc następującego zapisu:

$$w = \bar{w} + w' \quad (3)$$

$$u = \bar{u} + u' \quad (4)$$

$$v = \bar{v} + v' \quad (5)$$

gdzie:

$w$  – składowa pionowa ruchu powietrza,  
 $\bar{w}$  – wartość średnia składowej pionowej ruchu powietrza,

$w'$  – fluktuacje składowej pionowej ruchu powietrza,

$u$  – składowa pozioma ruchu powietrza,

$\bar{u}$  – wartość średnia składowej poziomej ruchu powietrza,

$u'$  – fluktuacje składowej poziomej ruchu powietrza,

$v$  – składowa poprzeczna ruchu powietrza,

$\bar{v}$  – wartość średnia składowej poprzecznej ruchu powietrza,

$v'$  – fluktuacje składowej poprzecznej ruchu powietrza.

Otrzymujemy:

$$\begin{aligned} F &= \overline{(w + w')(\rho + \rho')} = \\ &= \overline{w\rho + w\rho' + w'\rho + w'\rho'} = \\ &= \bar{w} \bar{\rho} + \bar{w} \bar{\rho}' + \bar{w}' \bar{\rho} + \bar{w}' \bar{\rho}' \end{aligned} \quad (6)$$

Z dekompozycji Reynoldsa – równanie (3), wynika, że średnia wartość

odchyłeń od średniej jest równa 0, czyli  $\overline{w'} = 0$  i  $\overline{\rho'} = 0$ . Ostatecznie można zapisać:

$$F = \underbrace{\overline{w\rho}}_I + \underbrace{\overline{w'\rho'}}_II \quad (7)$$

Z powyższego równania wynika, że średni pionowy strumień każdej wielkości skalarnej jest sumą pionowego strumienia wynikającego z ruchu średniego  $\overline{w\rho}$  i strumienia wirów  $\overline{w'\rho'}$ . Wyrażenie  $\overline{w'\rho'}$  jest kowariancją pionowej składowej ruchu powietrza i wielkości skalarnej – stąd nazwa metody. Ponieważ w odpowiednio długim czasie (w praktyce nawet do 60 minut) suma pionowych składowych ruchu powietrza w ruchu turbulencyjnym jest bliska zeru (powietrze raz się unosi, raz opada, tzn.  $\overline{w} = 0$ ), otrzymujemy więc praktyczne równanie do obliczania strumieni w metodzie kowariancji wirów, które możemy zapisać następująco:

$$F = \overline{w'\rho'} \quad (8)$$

Tak więc turbulencyjny strumień wielkości skalarnej (np. ciepła jawnego, ciepła utajonego czy dwutlenku węgla wymienianego pomiędzy powierzchnią czynną a atmosferą) jest równy kowariancji pomiędzy fluktuacjami pionowej składowej ruchu powietrza ( $w'$ ) i wielkości skalarnej ( $\rho'$ ).

Najważniejszą zaletą metody kowariancji wirów jest brak empirycznych przybliżeń relacji strumień – gradient (Urbaniak 2006).

W celu wyznaczenia pionowego strumienia ciepła jawnego zmierzono fluktuacje pionowej składowej ruchu

powietrza oraz fluktuacje temperatury powietrza anemometrem ultradźwiękowym WindMaster 20 Hz firmy Gill Ins (rys. 2).

W anemometrach akustycznych mierzy się czas, po którym wysłany z emitera impuls ultradźwiękowy dotrze do detektora. Jeżeli powietrze porusza się w kierunku zgodnym z kierunkiem propagacji impulsu, to czas mierzony będzie krótszy niż w powietrzu nieruchomym, a jeżeli przeciwnie, to czas ten będzie dłuższy. Z porównania czasów można określić kierunek przepływu porcji powietrza oraz jego prędkość. Czujniki wyposażone są w 3 pary nadajników – odbiorników, dzięki czemu możliwe jest mierzenie ruchu porcji powietrza we wszystkich kierunkach ( $x, y, z$ ); każdy nadajnik jest jednocześnie odbiornikiem,



RYSUNEK 2. Anemometr akustyczny WindMaster firmy Gill Ins

FIGURE 2. Sonic anemometer WindMaster Gill Ins

więc sygnał akustyczny wysyłany jest łącznie sześciokrotnie w obie strony dla każdej z trzech par nadajników – odbiorników. W rezultacie możliwe jest precyzyjne wyznaczenie 3 składowych ruchu masy powietrza, a także wyznaczenie fluktuacji temperatury powietrza.

Pomiary wykonano z częstotliwością 10 Hz, przyjmowaną standardowo za dolną granicę w metodzie kowariancji wirów (Fortuniak 2006); jest to wartość wystarczająca, pozwalająca na uwzględnienie wirów o małym rozmiarze.

Najdokładniejszym, z obecnie stosowanych, sposobem pomiaru strumienia ciepła utajonego jest omawiana wcześniej metoda kowariancji wirów z użyciem czujnika do pomiaru fluktuacji gęstości pary wodnej z dużą częstotliwością, na przykład analizatora gazowego Li – 7500, firmy LI-COR. Jest to jednak przyrząd kosztowny, dlatego w badaniach wykorzystano metodę stosunku Bowena (należącą do grupy metod gradientowych), opisanego równaniem:

$$\beta = \frac{S}{E} \quad (9)$$

Stosując teorię, turbulencyjne strumienie ciepła jawnego ( $S$ ) i utajonego ( $LE$ ) można przedstawić następująco (Paszyński i in. 1999):

$$S = -c_p \rho K_H \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (10)$$

$$E = -l \rho K_w \frac{\partial q}{\partial z} \quad (11)$$

gdzie:

$K_H$  – współczynnik turbulencyjnej wymiany ciepła [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ],

$K_w$  – współczynnik turbulencyjnej wymiany pary wodnej [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ],

$c_p$  – ciepło właściwe powietrza przy stałym ciśnieniu [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ],

$l$  – ciepło właściwe parowania/kondensacji [ $J \cdot kg^{-1}$ ],

$\rho$  – gęstość powietrza [ $kg \cdot m^{-3}$ ],

$\theta$  – temperatura potencjalna [K],

$q$  – wilgotność właściwa powietrza [ $kg \cdot kg^{-1}$ ].

Tak określone strumienie są tylko pewną parametryzacją rzeczywistych strumieni (Fortuniak 2003), bazującą na analogii między transportem molekularnym i turbulencyjnym (Paszyński i in. 1999).

Uwzględniając wzory (10) i (11), po zastąpieniu temperatury potencjalnej temperaturą absolutną, stosunek Bowena przedstawia się następująco:

$$\frac{S}{E} = \frac{K_H}{K_w} \cdot \frac{c_p}{l} \cdot \frac{\rho}{p} \cdot \frac{\frac{\partial T}{\partial z}}{\frac{\partial q}{\partial z}} \quad (12)$$

W warstwie rozwiniętej turbulencji zakłada się podobieństwo turbulencyjnego transportu pary wodnej do turbulencyjnego transportu ciepła w szerokim zakresie warunków stratyfikacji powietrza, czyli:

$$K_w = K_H \quad (13)$$

Uwzględniając równość współczynników wymiany turbulencyjnej oraz zastępując pochodne różnicami skończonymi, równanie (12) można zapisać w postaci:

$$\frac{S}{E} = \frac{c_p}{l} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta q} \quad (14)$$

Przyjmując, że:

$$q = \delta \cdot \frac{e}{p} \quad (15)$$

gdzie:

$\delta$  – stosunek masy cząsteczkowej pary wodnej do masy cząsteczkowej powietrza suchego,

$e$  – ciśnienie aktualne pary wodnej [hPa],

$p$  – ciśnienie atmosferyczne [hPa],

oraz po wprowadzeniu definicji stałej psychrometrycznej ( $\gamma$ ):

$$\gamma = \frac{c_p P}{I \delta} \quad (16)$$

stosunek Bowena przyjmuje postać (Paszyński i in. 1999):

$$\beta = \frac{S}{E} = \gamma \cdot \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (17)$$

Metoda stosunku Bowena obarczona jest błędem wynikającym z niedokładności parametryzacji rzeczywistych strumieni oraz trudności z wyznaczeniem wartości gradientów w przypadku intensywnego mieszania (Fortuniak 2003). Metoda ta zawodzi, gdy strumienie ciepła jawnego i utajonego są równe co do wartości bezwzględnej, lecz odwrotnie skierowane, oraz w sytuacjach, gdy wartości salda promieniowania i strumienia ciepła w glebie są bardzo małe (Paszyński i in. 1999).

W prowadzonych badaniach strumień ciepła utajonego zostanie wyznaczony ze stosunku Bowena oraz zmierzonego metodą kowariancji wirów strumienia ciepła jawnego. Do określenia stosunku Bowena wykorzystano pomiary temperatury powietrza i ciśnienia aktualnego pary wodnej wykonane przy użyciu termohigrometrów HMP45A firmy Vaisala, umieszczonych na wysokości 50 i 150 cm nad powierzchnią czynną (rys. 3).



RYSUNEK 3. Termohigrometry  
FIGURE 3. Relative humidity and temperature probes

Anemometr, saldometr i termohigrometry umieszczono na specjalnie skonstruowanym statywie, wysokości maksymalnej 3,5 m, z możliwością jego regulacji (rys. 4). Istotnym warunkiem pomiarów pionowych strumieni ciepła jawnego jest konieczność dokładnej pionowej instalacji anemometru i zapewnienia stabilności masztu pomiarowego na torfowym podłożu. W tym celu zastosowano podpory masztu, umieszczone na wbitych w podłoże 2-metrowych drewnianych palach; dodatkowo zastosowano odciążenie mocowane szpilkami długości 1 m.

Stanowisko pomiarowe usytuowano w odległości 500 m od jedynej przebiegającej tam drogi. Najbliższe zarośla i grupy drzew (głównie młode brzozy) znajdowały się w odległości 400 m od masztu w kierunku północno-wschodnim oraz 450 m w kierunku południo-



RYSUNEK 4. Wieża pomiarowa na Bagnie Ławki  
FIGURE 4. Measurement station in Ławki Marsh

wo-wschodnim. Od strony zachodniej, południowo-zachodniej i południowej znajdowała się otwarta przestrzeń łąki, ograniczona od strony południowej ścianą lasu w odległości około 5 km, a od strony zachodniej korytem Biebrzy, zlokalizowanym w odległości około 9 km.

Do pomiaru gęstości strumienia ciepła w glebie ( $G$ ) wykorzystano płytki termoparowe wykonane z materiału o przewodnictwie cieplnym zbliżonym do przewodnictwa cieplnego gleby. Różnica temperatury między górną i dolną powierzchnią płytki jest proporcjonalna do wielkości strumienia ciepła w glebie i wywołuje proporcjonalną wartość napięcia. W badaniach wykorzystano 4 płytki glebowe HFP01 firmy Hukseflux (rys. 5), umieszczone na głębokości 1 cm pod powierzchnią gleby.



RYSUNEK 5. Płytki glebowe HFP01 firmy Hukseflux

FIGURE 5. Heat flux plate HFP01 Hukseflux

Centralnym elementem opisanego systemu pomiarowego jest datalogger CR 1000 firmy Campbell Sci., służący do rejestracji wyników i kontroli działania systemu w trakcie pomiarów. Rejestrowano średnie wartości 1-minutowe salda promieniowania, strumieni ciepła w glebie oraz temperatury i wilgotności względnej powietrza, a także chwilowe wartości fluktuacji 3 składowych ruchu powietrza i temperatury mierzonej anemometrem akustycznym z częstotliwością 10 Hz.

## Podsumowanie

Prowadzenie badań nad strukturą bilansu cieplnego w dolinie dolnej Biebrzy związane jest z istniejącą potrzebą rozpoznania warunków energetycznych powierzchni czynnej w rejonie jednego z najcenniejszych przyrodniczo obszarów wodno-błotnych w Europie. Szcze-



gólnie istotne w rozpoczętych badaniach jest:

- wykorzystanie nowoczesnej metody kowariancji wirów w pomiarach gęstości strumienia ciepła odczuwalnego,
- możliwość wzbogacenia dotychczasowych badań o mało rozpoznaną w tych warunkach strukturę bilansu cieplnego,
- przeprowadzenie badań w dolinie rzeki Biebrzy – obszarze o szczególnych walorach przyrodniczych,
- możliwość wykorzystania uzyskanych wyników w badaniach modelowych uwzględniających ewapotranspirację, na przykład dotyczących zasad gospodarowania wodą.

## Literatura

- BALDOCCHI D.D., MEYERS T.P. 1991: Trace gas exchange at the floor of a deciduous forest: I. Evaporation and CO<sub>2</sub> Efflux. *Journal of Geophysical Research, Atmospheres* 96: 7271–7285.
- BALDOCCHI D.D., FALGE E., LIANHONG G., OLSON R., HOLLINGER D., RUNNING S., ANTHONI P., BERNHOFER Ch., DAVIS K., EVANS R., FUENTES J., GOLDSTEIN A., KATUL G., LAW B., LEE X., MALHI Y., MEYERS T., MUNGER W., OECHEL W., PAW U. K.T., PILEGAARD K., SCHMIDT H.P., VALENTINI R., VERMA S., VESELAQ T., WILSON K., WOFSY S. 2001: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society* 82, 11.
- BLACK T.A., DEN HARTOG G., NEUMANN H.H., BLANKEN P.D., YANG P.C., RUSSELL C., NESIC Z., LEE X., CHEN S.G., STAEBLER R., NOVAK M.D. 1996: Annual cycles of water vapour and carbon dioxide fluxes in and above a boreal aspen forest. *Global Change Biology* 2, 3: 219–229.
- BYCZKOWSKI A., FAL B. 2004: Wody powierzchniowe. W: Kotlina Biebrzańska i Biebrzański Park Narodowy. Aktualny stan, zagrożenia i potrzeby czynnej ochrony środowiska. Red. H. Banaszuk, Wydaw. Ekonomia i Środowisko, Białystok: 113–183.
- DEMBEK W. 2000: Wybrane aspekty zróżnicowania torfowisk w młodo- i starogłacjalnych krajobrazach Polski Wschodniej. Rozpr. hab. Wydaw. IMUZ, Falenty.
- DEMBEK W., OŚWIT J., RYCHARSKI M. 2005: Torfowiska i torfy w Pradolinie Biebrzy. W: Przyroda Biebrzańskiego Parku Narodowego. Red. A. Dyrz, C. Werpachowski. Wydaw. Biebrzański Park Narodowy, Osowiec – Twierdza: 33–58.
- FORTUNIAK K. 2003: Miejska wyspa ciepła, podstawy energetyczne, studia eksperymentalne, modele numeryczne i statystyczne. Rozprawa habilitacyjna. Wydaw. UŁ, Łódź.
- FORTUNIAK K. 2006: Wybrane problemy pomiarów strumieni turbulencyjnych metodą kowariancji wirów. *Annales UMCS, B, LXI*, 20: 175–183.
- FORTUNIAK K., OFFERLE B., GRIMMOND S., OKE T., KŁYSIK K., WIBIG J. 2001: A system to observe the urban energy balance: Initial results from winter – time measurements in Łódź. *Annales UMCS, B, LV/LVI*, 20: 167–176.
- GÓRNIAK A. 2004: Klimat i termika wód powierzchniowych Kotliny Biebrzańskiej. W: Kotlina Biebrzańska i Biebrzański Park Narodowy. Aktualny stan, zagrożenia i potrzeby czynnej ochrony środowiska. Red. H. Banaszuk. Wydaw. Ekonomia i Środowisko, Białystok.
- JÓZEFczyk D. 2005: Dobowy przebieg strumieni dwutlenku węgla i pary wodnej w krajobrazie rolniczym. Rozprawy doktorska. Katedra Agrometeorologii Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, Poznań.
- KĘDZIORA A. 1994: Micrometeorological and remote sensing methods used in environmental investigation. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 405: 101–114.
- KOSSOWSKA-CEZAK U., OLSZEWSKI K., PRZYBYLSKA G. 1991: Klimat Kotliny Biebrzańskiej. W: Bagna Biebrzańskie. Red.

- H. Okruszko. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 372: 119–159.
- MIODUSZEWSKI W., ŚLESICKA A., QUERNER E. 2004: Warunki Zasilania Doliny Dolnej Biebrzy. *Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie* 1(10): 67–78.
- OKRUSZKO T., WASILEWICZ M., DEMBEK W., RYCHARSKI M., MATUSZKIEWICZ A. 2003: Analiza zmian warunków wodnych, szaty roślinnej i gleb Bagna Ławki w Dolinie Biebrzy. *Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie* 3, 1(7): 107–128.
- OLEJNIK J. 1988: The empirical method of estimating mean daily and mean ten-day values of latent and sensible heat fluxes near the ground. *Journal of Applied Meteorology* 27: 1359–1368.
- OLEJNIK J. 1996: Modelowe badania struktury bilansu cieplnego i wodnego zlewni w obecnych obecnych przyszłych warunkach klimatycznych. Rozprawa habilitacyjna. AR im A. Cieszkowskiego w Poznaniu, Poznań.
- PASZYŃSKI J. 1972: Studies on the heat balance and on evapotranspiration. *Geogr. Pol.* 22.
- PASZYŃSKI J. 1979: Energy exchange in plant environment. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 220: 81–89.
- PASZYŃSKI J., MIARA K., SKOCZEK J. 1999: Wymiana energii między atmosferą a podłożem jako podstawa kartowania topoklimatycznego. *Dokumentacja Geograficzna* 14, IGiPZ PAN, Warszawa.
- PAWLAK W., SIEDLECKI M., FORTUNIAK K., KŁYSIK K. 2005: Dobowa zmienność strumienia CO<sub>2</sub> nad polem pszenżyta. *Acta Agrophysica* 6(2): 473–483.
- PAWLAK W., FORTUNIAK K., OFFERLE B., GRIMMOND C.S.B. 2007: Zastosowanie metody korelacyjnej do pomiaru strumieni CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O z powierzchni trawiastej. *Przeгляд Geofizyczny* LII, 2: 95–106.
- SWINBANK W.C. 1951: The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. *Journal of Meteorology* 8, 3: 135–145.
- URBANIAK M. 2006: Ocena sezonowej zmienności strumieni dwutlenku węgla i pary wodnej na terenach podmokłych metodą kowariancji wirów. Rozprawa doktorska. Katedra Agrometeorologii AR im. A. Cieszkowskiego w Poznaniu, Poznań.

## Summary

### Measurement system of heat balance elements in marsh grassland in the river Biebrza lower basin.

The Biebrza River valley is the most valuable wetland's complex in Poland. The biodiversity of endangered plants and animals observed in this region is outstanding. The lower river valley is considered as one of the most natural wetland area in Europe since, only small reach of this valley was drained. The conservation of this valuable object depends also on maintaining of high soil moisture, therefore the knowledge about the water balance dynamic of this ecosystem seems to be crucial. The evaporation process is a common element of both water and heat cycles thus wetland surface heat balance studies will be helpful for modeling of local hydrological conditions. The paper presents the methodology of grassland ecosystem heat balance structure research which have just started at the Biebrza River valley. The automatic measurement system was developed at the Division of Meteorology and Climatology, and it is consisted of net radiometer – net radiation measurement, heat flux plates – soil heat flux density measurement, 3D sonic anemometer used for direct measurement of sensible heat flux (eddy covariance approach). Two thermohygrometers were installed additionally, which allow to estimate the latent heat flux density using the Bowen ratio method.

#### Author's address:

Małgorzata Kleniewska  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
Zakład Meteorologii i Klimatologii  
ul. Nowoursynowska 159, 02-787 Warszawa  
Poland  
e-mail: malgorzata\_kleniewska@sggw.pl