

AUTOMATYCZNY SYSTEM POMIAROWY DO BADANIA STRUKTURY BILANSU CIEPLNEGO OD CECHOWANIA DO PRAC POŁOWYCH

J. Leśny¹, J. Olejnik¹, B.H. Chojnicki¹, F. Eulenstein²

¹Katedra Agrometeorologii AR, 60-667 Poznań, ul. Witosa 45, jlesny@owl.au.poznan.pl.

²Centre for Agricultural Landscapes and Land Use Research, Müncheberg, Germany

S t r e s z c z e n i e. Bardzo dobrym mikrometeorologicznym opisem środowiska, charakteryzującym obszary o różnej szacie roślinnej, jest struktura bilansu cieplnego powierzchni czynnej, którą można opisać równaniem: $Rn + LE + S + G = 0$. Strumienie Rn i G mogą być mierzone przy pomocy komercyjnych czujników pomiarowych, jednak pomiary strumieni LE i S są trudniejsze do wykonania. Do ich oszacowania można korzystać z metody bilansu cieplnego powierzchni czynnej z wykorzystaniem współczynnika Bowena. Metoda ta wymaga jednak bardzo dokładnych pomiarów pionowych profili temperatury powietrza i ciśnienia pary wodnej nad analizowaną powierzchnią. W Katedrze Agrometeorologii Akademii Rolniczej w Poznaniu skonstruowano nowe psychrometry oparte na termometrach półprzewodnikowych. W przedstawianej pracy opisano także stosowaną metodę kalibracji psychrometrów, termometrów i higrometrów w szerokim zakresie temperatur i wilgotności. Wszystkie czujniki podłączano do specjalnie zaprojektowanego dataloggera. Powstały system pomiarowy jest bardzo uniwersalny i może być wykorzystywany do wielu rodzajów pomiarów mikrometeorologicznych.

S ł o w a k l u c z o w e: psychrometr półprzewodnikowy, metody kalibracji, pomiary bilansu cieplnego powierzchni czynnej.

WSTĘP

Strumienie energii występujące w środowisku naturalnym można opisać przy pomocy równania bilansu cieplnego powierzchni czynnej. Struktura bilansu cieplnego powierzchni czynnej jest zależna od wielu parametrów biotycznych i abiotycznych. Wśród parametrów abiotycznych do najważniejszych należą: warunki meteorologiczne oraz stan uwilgotnienia środowiska, a wśród procesów biotycznych najważniejsze to rodzaj szaty roślinnej oraz jej faza fenologiczna i kondycja [6]. Często bilans cieplny powierzchni czynnej jest przedstawiany w postaci równania [1,3,4,10]:

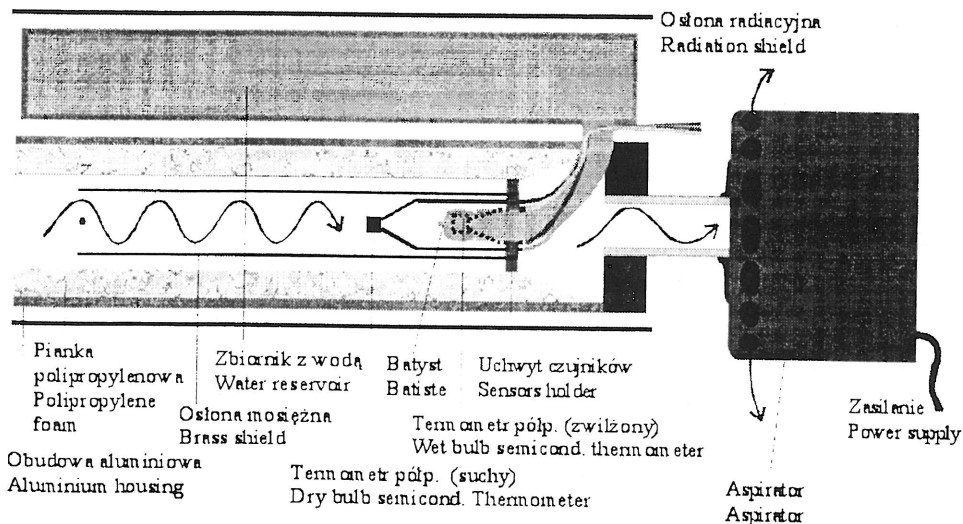
$$Rn + LE + S + G = 0 \quad (1)$$

gdzie: Rn jest saldem promieniowania, LE jest gęstością strumienia ciepła utajonego, S jest gęstością strumienia ciepła jawnego, a G jest gęstością strumienia ciepła wymienianego z podłożem. Wszystkie wielkości wyrażane są w Wm^{-2} . Przyjmuje się, że strumienie dochodzące do powierzchni przyjmują wartości dodatnie, a odchodzące wartości ujemne. Dysponując danymi pomiarowymi składników bilansu cieplnego różnych powierzchni czynnych i korzystając z odpowiednich procedur parametryzacyjnych, istnieje możliwość utworzenia modeli opisujących procesy wymiany energii między podłożem a atmosferą. Dysponując takimi metodami można prowadzić badania modelowe strumieni energii występujących w środowisku, stosunkowo łatwo zmieniając skalę badanych procesów, poczynając od poziomu pojedynczej rośliny, poprzez pole uprawne, obszar dorzecza, a na regionie lub kontynencie kończąc. Pomiaru poszczególnych składników bilansu cieplnego powierzchni czynnej są możliwe głównie w mikroskali, są one jednak stosunkowo skomplikowane [5] i wymagają wysokiej klasy sprzętu pomiarowego bez względu na przyjętą metodykę ich prowadzenia [9]. Do pomiaru salda promieniowania (Rn) i strumienia ciepła wymienianego z podłożem (G) mogą służyć dostępne na rynku czujniki komercyjne [7,8]. Znacznie poważniejsze problemy stwarza pomiar turbulencyjnych strumieni ciepła wymienianego między atmosferą a podłożem (LE i S). Przykładowo, korzystając z metody kowariancji wirów, do pomiaru turbulencyjnych strumieni ciepła utajonego lub jawnego, można skorzystać z dostępnych na rynku czujników komercyjnych takich jak spektrofotometry i anemometry akustyczne. Zestawy pomiarowe oparte na tych czujnikach są jednak niezwykle kosztowne, ponieważ zastosowane czujniki muszą być bardzo mało bezwładne (fast response sensors, ang.) oraz wymagają równie szybkich i bardzo dokładnych mierników mogących jednocześnie zapamiętać olbrzymią liczbę danych pomiarowych [9]. Dlatego właśnie kilka lat temu w Katedrze Agrometeorologii Akademii Rolniczej w Poznaniu podjęto próbę konstrukcji systemu pomiarowego, służącego do pomiarów wszystkich czterech składników bilansu cieplnego i opartego na mniej technicznie zaawansowanych czujnikach i systemie akwizycji danych. Aby maksymalnie uprościć system pomiarowy, wykorzystano metodę bilansowania wszystkich strumieni opartą na stosunku Bowena [2,5,8]. W niniejszej pracy przedstawiono system pomiarowy, którego prototyp próbnie zastosowano w badaniach polowych w 1999 roku, a po dalszych pracach konstrukcyjnych szerzej wykorzystano w

pomiarach w roku 2000. Istotnym elementem systemu jest nowy typ psychrometrów służących do wyznaczania gradientów temperatury i prężności pary wodnej w przygruntowej warstwie powietrza. Jako czujniki temperatury (suchy i zwilżony) wykorzystano czujniki półprzewodnikowe.

PSYCHROMETR PÓŁPRZEWODNIKOWY

Poglądowy schemat psychrometru opartego na czujnikach półprzewodnikowych przedstawiono na rys. 1. Ponieważ wymiary czujników półprzewodnikowych są niewielkie, umocowano je na nóżkach montażowych co pozwoliło zminimalizować wielkość i ciężar psychrometru. Niewielka powierzchnia parująca termometru zwilżonego spowodowała, że naczynie na wodę destylowaną o objętości zaledwie 9 cm³ wystarcza na tygodniową pracę psychrometru w systemie pomiarowym. Zaletą psychrometru półprzewodnikowego jest również możliwość dokonywania pomiaru temperatury każdym miliwoltomierzem cyfrowym w zakresie od 200 do 300 mV i rozdzielczości 0,1 mV. Takie miliwoltomierze są obecnie powszechnie stosowane w większości dataloggerów. Dodatkową zaletą tych czujników jest ich niska cena.



Rys. 1. Schemat budowy psychrometru półprzewodnikowego.

Fig. 1. Scheme of semiconductor psychrometer.

Temperaturę powietrza przy pomiarze czujnikiem półprzewodnikowym oblicza się korzystając ze wzoru:

$$t = \frac{V(t) + b}{k} \quad (2)$$

gdzie: t jest temperaturą powietrza, $V(t)$ jest wartością napięcia w temperaturze t , a b i k są współczynnikami charakterystycznymi dla każdego czujnika.

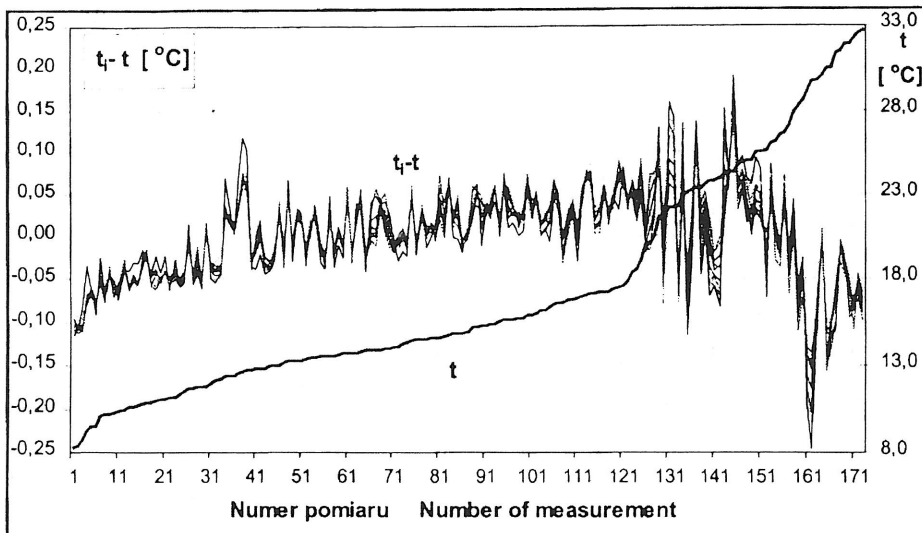
Producent zapewnia wysoką powtarzalność sygnałów elektrycznych czujników, ale niestety nie wyposaża ich w świadectwa cechowania. Zakłada, że współczynnik k jest równy 1, a za b radzi przyjąć wartość "-273". Wystarcza to do pomiarów temperatury z dokładnością 1 stopnia. Chcąc jednak stosować czujniki półprzewodnikowe w psychrometrach do wyznaczania gradientów temperatury i ciśnienia pary wodnej konieczne jest uzyskanie zdecydowanie lepszej dokładności wskazań. Aby sprostać tym wymaganiom konieczne jest cechowanie czujników.

CECHOWANIE PSYCHROMETRÓW

Aby jednocześnie można było cechować kilkanaście psychrometrów zbudowano specjalną komorę izotermiczną zapewniającą równomierny rozkład temperatury i ciśnienia pary wodnej oraz pozwalającą utrzymywać ich wartości na żądanym poziomie. Psychrometry cechowano w zakresie temperatur od 8 do 33 °C, gdyż w badaniach terenowych temperatury rzadko przekraczają te granice. Jako wzorzec wykorzystywano miernik temperatury punktu rosy oraz temperatury powietrza firmy Meteolabor AG ze Szwajcarii o powtarzalności 0,05 °C.

W trakcie kalibracji w komorze utrzymywano powolny wzrost temperatury powietrza i ciśnienia pary wodnej. Porównując wartości sygnałów czujników półprzewodnikowych (w mV) z temperaturami czujnika wzorcowego, wyznaczano współczynniki a i b z równania (2). Na rys. 2A pokazano wartości różnic pomiędzy wzorcem a cechowanymi termometrami na tle zmian temperatury w komorze.

Ponieważ opisywane psychrometry wykorzystywane są do wyznaczania pionowych gradientów temperatury i ciśnienia pary wodnej zatem najważniejsze jest aby mierzyły temperaturę i ciśnienie pary wodnej z dużą dokładnością względem siebie. Aby to osiągnąć wybierano jeden psychrometr, którego wartości najmniej odbiegały od wzorca i ponownie wyznaczano współczynniki a i b wszystkich pozostałych czujników na podstawie wskazań wybranego psychrometru. Uzyskiwane rozbieżności wskazań są wówczas zdecydowanie mniejsze niż w przypadku porównywania tylko

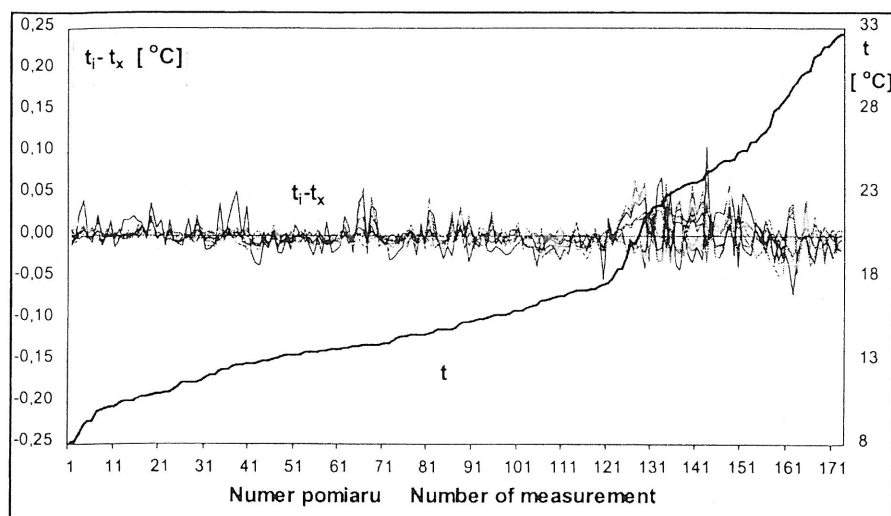


Rys. 2A. Przebieg wartości temperatury (t) wewnątrz komory podczas kalibracji psychrometrów, oraz wartości różnic temperatur ($t_i - t$) pomiędzy termometrami suchymi psychrometrów a wzorcem. Temperatury termometrów (t_i) wyznaczono korzystając z regresji liniowej opisującej związek temperatury wzorca z wartościami w mV mierzonymi dla każdego z czujników.

Fig. 2A. The course of air temperature (t) inside the calibration chamber during the calibration procedure and the course of temperature differences ($t_i - t$) between dry bulb sensors and the reference sensor. The temperatures of dry bulb sensors (t_i) were calculated from linear regression between reference sensor temperature and electrical signal (mV) of each calibrated dry bulb.

ze wzorcem firmy Meteolabor. Różnice temperatur pomiędzy wybranym psychrometrem wzorcowym a pozostałymi już po ponownym wyznaczeniu współczynników przeliczeniowych zilustrowano na rys. 2B.

Opisana procedura kalibracyjna umożliwia wykorzystanie w pomiarach temperatury dobrych jakościowo czujników nie posiadających jednak świadectw cechowania. Często w badaniach naukowych pewne wielkości mierzone są jednocześnie na kilku poziomach (pomiar gradientów), istotne jest wówczas aby wykorzystywane czujniki mierzyły z dużą powtarzalnością względem siebie. Porównując rys. 1 i 2 widać jak niewiele mogą różnić się pomiędzy sobą wskazania kilku termometrów, a jednocześnie na ile mogą one odbiegać od bezwzględnego wzorca. Taką powtarzalność wskazań można osiągnąć, stosując opisaną procedurę cechowania psychrometrów.



Rys. 2B. Przebieg wartości temperatury (t) wewnątrz komory podczas kalibracji psychrometrów, oraz wartości różnic temperatur ($t_i - t_x$) pomiędzy termometrami suchymi psychrometrów a wybranym termometrem. Temperatury termometrów (t_i) wyznaczono korzystając z regresji liniowej opisującej związek temperatury wybranego termometru z wartościami w mV mierzonymi dla każdego z czujników.

Fig. 2B. The course of air temperature (t) inside the calibration chamber during the calibration procedure and the course of temperature differences ($t_i - t_x$) between dry bulb sensors and one selected dry bulb sensor. The temperatures of dry bulb sensors (t_i) were calculated from linear regression between selected dry bulb sensor temperature and electrical signal (mV) of each calibrated dry bulb.

SYSTEM DO POMIARÓW MIKROMETEOROLOGICZNYCH

Równolegle z pracami nad psychrometrem opracowano koncepcję i zbudowano cały system pomiarowy, dzięki któremu możliwe będą badania składników bilansu cieplnego z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody Bowena (Rys. 3). Integralną część całego systemu stanowi datalogger, który jednocześnie mierzy i magazynuje w pamięci dane. Wymagania sprzętowe metody Bowena, mimo że uchodzi ona za stosunkowo prostą, są na tyle wysokie, że powstały datalogger jest urządzeniem bardzo zaawansowanym technicznie, a w efekcie stosunkowo uniwersalnym. Może on być stosowany do prawie wszystkiego rodzaju pomiarów meteorologicznych. Datalogger dysponuje 32 kanałami pomiarowymi, do których można podłączyć nie tylko opisane półprzewodnikowe psychrometry, ale prawie wszystkie oferowane współcześnie czujniki meteorologiczne. Jego możliwości pomiarowe przedstawiono w tab. 1. Dodatkowo jest on wyposażony w specjalny kanał sterujący, który w przedstawianym systemie uruchamia aspirację psychrometrów.

Pomiar na każdym z kanałów trwa po 1/3 sekundy. Pomiary są wykonywane kolejno na wszystkich kanałach i łączą się w cykle pomiarowe, które można powtarzać maksymalnie co 20 sekund. Można je łączyć w serie pomiarowe składające się z dowolnej ilości cykli. Długość przerw pomiędzy seriami jest ustalana przez operatora.

System do pomiaru bilansu cieplnego (Rys. 3) składa się z 8 psychrometrów,

Tabela 1. Możliwości pomiarowe dataloggera stosowanego w systemie pomiarowym

Table 1. The possibilities measurements of datalogger using in described measurement system

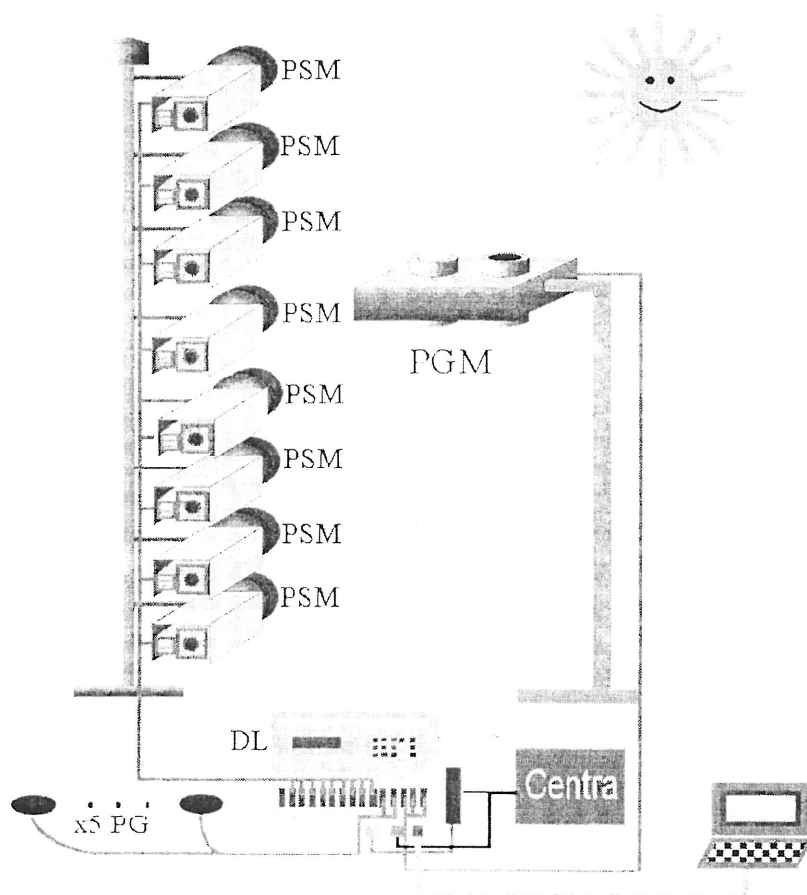
Rodzaj pomiaru	Zakres pomiarowy	Rozdzielczość
Napięcie	$\pm 2,5$ V	0,1 mV
	± 300 mV	10 mV
	± 30 mV	1 μ V
	+600 mV	10 μ V
	+60 μ V	1 μ V
Rezystancja	5000 om	0,1 om
	500 om	0,01 om
Temperatura	PT100 -200 °C do +800 °C	0,1 °C
	PT1000 -200 °C do +800 °C	0,1 °C
	termopara J -150 °C do +1050 °C	0,1 °C
	termopara K -150 °C do +1350 °C	0,1 °C
	termopara T -150 °C do +400 °C	0,1 °C
	termopara E -150 °C do +800 °C	0,1 °C
Prąd	± 25 mA	1 μ A

pyranopyrgeometru oraz płytek glebowych. Na trzy minuty przed uruchomieniem pomiarów datalogger włącza aspirację psychrometrów, po czym wykonuje serię 80 cykli pomiarowych. Procedura jest powtarzana co godzinę, a po wypełnieniu pamięci dane są przegrywane do przenośnego komputera typu PC. Dalsze przetwarzanie zebranych danych, czyli wyliczanie średnich, gradientów, a w ostateczności poszczególnych strumieni energii może odbywać się już w dowolny sposób ustalony przez użytkownika systemu.

Tak zebrane dane służą następnie do obliczenia wartości poszczególnych składników bilansu cieplnego powierzchni czynnej według metodyki opisanej w pracach Olejnika [6], Kędziory [1], Leśnego [2] i Olejnika i in. [10].

POMIARY TERENOWE

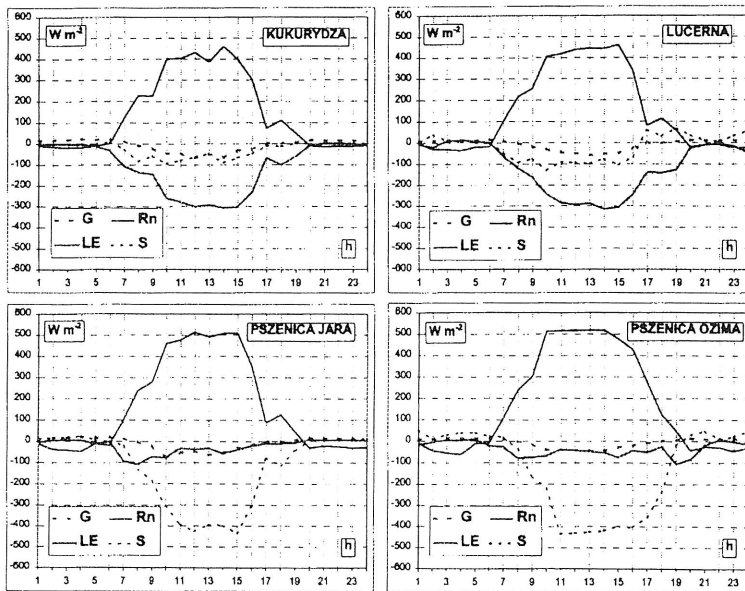
W sezonie wegetacyjnym 2000 wykorzystując cztery opisane powyżej systemy pomiarowe wykonano długoterminowe badania terenowe. Pomiary przeprowadzano



Rys. 3. System pomiarowy do badania składowych bilansu cieplnego zmodyfikowaną metodą stosunku Bowena (PSM - psychrometr, PGM - pyranopyrgeometr, DL - datalogger, PG - płytka glebowa).

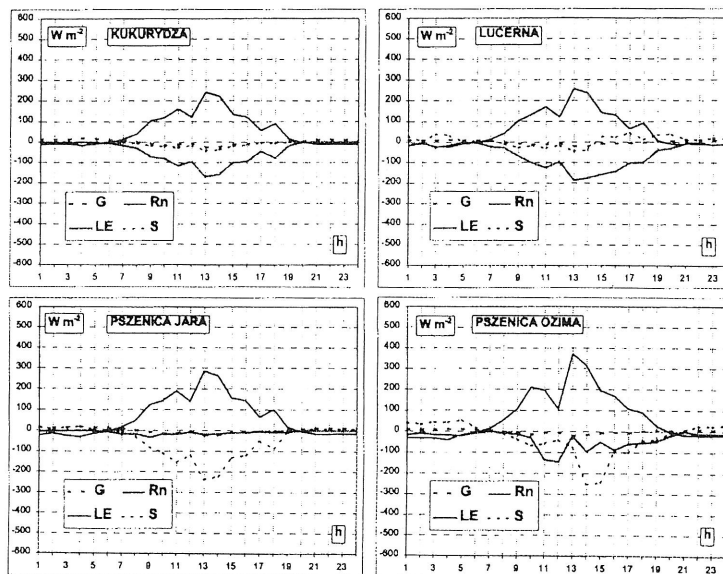
Fig. 3. Scheme of heat balance components measuring system for modified Bowen ratio method (PSM - psychrometer, PGM - pyranopyrgeometer, DL - datalogger, PG - soil heat plate).

w lipcu i sierpniu jednocześnie na czterech ekosystemach rolniczych: kukurydzy, lucernie, pszenicy jarej i pszenicy ozimej. Na rys. 4 i 5 przedstawiono dobowe przebiegi składników bilansu cieplnego badanych ekosystemów, celowo wybierając dni z różnym przebiegiem pogody. 30.07.2000 (Rys. 4) był dniem słonecznym o wyższej temperaturze powietrza, 31.07.2000 (Rys. 5) był pochmurny i chłodniejszy. Różnica zachmurzenia porównywanych dni istotnie zmienia wartości salda promieniowania (R_n), a w konsekwencji także pozostałych składników bilansu cieplnego. Bardzo wyraźnie różnią się pomiędzy sobą także dobowe przebiegi



Rys. 4. Dobowy przebieg składników bilansu cieplnego czterech różnych ekosystemów w dniu 30.07.2001.

Fig. 4. Daily course of heat balance components for four different ecosystems on 30.07.2001.



Rys. 5. Dobowy przebieg składników bilansu cieplnego czterech różnych ekosystemów w dniu 31.07.2001.

Fig. 5. Daily course of heat balance components for four different ecosystems on 31.07.2001.

ich wartości, dla poszczególnych ekosystemów. Kukurydza i lucerna były w pełni rozwoju, ich indeksy ulistowienia osiągały wartości odpowiednio 2,8 i 3,0, dzięki częstym opadom, zapas wody w glebie całkowicie pokrywał zapotrzebowanie roślin, razem powodowało to, że prawie cała dostępna energia wykorzystywana była na ewapotranspirację. Jak widać z rysunków działo się tak zarówno w dniu o wysokich jak i niskich wartościach salda promieniowania. Takie wykorzystanie dostępnej energii pozwala zakwalifikować te powierzchnie jako silnie ewaporacyjne.

Obie pszenice w okresie badań były już nie aktywne fizjologiczne i faktycznie nie zachodziła na tych powierzchniach transpiracja. Niewielkie parowanie było możliwe tylko dzięki intercepcji lub nocnej kondensacji zachodzących na rozpatrywanych powierzchniach. Parowanie wody bezpośrednio z powierzchni gleby było znikome, gdyż w warstwie suchych roślin nie występował turbulencyjny ruch powietrza i przenikanie pary przez szatę roślinną odbywało się wyłącznie poprzez dyfuzję. W efekcie większość dostępnej energii wykorzystywana była na ogrzewanie powietrza, należy stwierdzić, że były to ekosystemy typowo konwekcyjne.

PODSUMOWANIE

Opisane w niniejszym opracowaniu urządzenia mogą zostać skonfigurowane w zintegrowany system do oceny struktury bilansu cieplnego, mogą być też wykorzystywane do wykonywania standardowych pomiarów meteorologicznych oraz, do monitorowania różnego rodzaju procesów zachodzących w otaczającym nas środowisku. Mimo że zasadniczym motorem powstania systemu była chęć jednoczesnego badania struktury bilansu cieplnego kilku ekosystemów to powstały system okazał się bardzo uniwersalny i z pewnością znajdzie wielorakie zastosowanie. Obecnie trwają prace nad jego modyfikacją, której celem jest maksymalne wydłużenie bezobsługowego czasu pracy.

PIŚMIENNICTWO

1. **Kędziora A.:** Podstawy agrometeorologii. PWRiL, Poznań, 1999.
2. **Leśny J.:** Analiza wpływu pokrywy roślinnej na strukturę bilansu cieplnego powierzchni czynnej. Praca doktorska, biblioteka AR w Poznaniu, 1998.
3. **Monteith J.L.:** Fizyka środowiska biologicznego. PWN, Warszawa, 1977.
4. **Oke T.R.:** Boundary layer climates. Methuen & Co LTD, New York, 372, 1978.
5. **Olejniki J.:** The empirical method of estimating means daily and mean ten-day values of latent and sensible-heat near the ground. *J. Appl. Meteorol.*, 12, 1358-1369, 1988.
6. **Olejniki J.:** Modelowe badania struktury bilansu cieplnego i wodnego zlewni w obecnych i przyszłych warunkach klimatycznych. Praca habilitacyjna, *Rocz. AR w Poznaniu, Rozpr. Nauk.* 268, 1996.

7. Olejnik J., Leśny J., Eulenstein F., Kędziora A.: Ekstremalne wartości składników bilansu cieplnego agroekosystemów w różnych warunkach klimatycznych. *Fol. Univ. Agric. Stetin.* 202 Agriculture, 79, 179-184, 1999.
8. Olejnik J., Eulenstein F., Kędziora A., Werner A.: Comparison of daily evapotranspiration rates obtained from water balance model and modified Bowens ratio method. *Int. Agrophysics*, 15, 37-49, 2001.
9. Olejnik J., Kapuściński J., Tuchołka S.: Metody oceny składowych bilansu cieplnego w badaniach nad środowiskiem Rocz.AR w Poz, CCLXVIII, 229-243, 1994.
10. Paszyński J.: Studies on the heat balance and evapotranspiration. *Geogr. Pol.* 22, 35-51, 1972.

AUTOMATICAL MEASUREMENT SYSTEM FOR HEAT BALANCE STRUCTURE INVESTIGATIONS FROM CALIBRATION TO FIELDS STUDY

*J. Leśny*¹, *J. Olejnik*¹, *B. H. Chojnicki*¹, *F. Eulenstein*²

¹Department of Agrometeorology AU, 60-667 Poznań, Witosza 45, jlesny@owl.au.poznan.pl.

²Centre for Agricultural Landscapes and Land Use Research, Müncheberg, Germany

S u m m a r y. The heat balance structure is a very good way of description of areas with different plant canopy from the point of view of micrometeorology. The heat balance of an active surface can be written as follows: $Rn + LE + S + G = 0$. The Rn and G fluxes can be measured by the use of commercial sensors while the measurements of LE and S fluxes are far more complicated. The heat balance method based on Bowen ratio can be used for estimation of those two fluxes. This method required very precise gradient measurements of air temperature and water vapour pressure above an active surface. New semiconductor psychrometers were constructed in the Department of Agrometeorology of Agricultural University of Poznań. The methods of calibration of psychrometers, thermometers and hygrometers in a wide range of air temperature and humidity are described in this paper. All psychrometers and net radiation sensors as well as the soil heat plates where connected with a data-logger. The whole, new system can be used for measurements of micrometeorological parameters above different agroecosystems.

K e y w o r d s: semiconductor psychrometer, methods of calibration, heat balance of active surface measurements.