

O RELACJI MIĘDZY STRUMIENIEM CIEPŁA W GLEBIE A BILANSEM PROMIENIOWANIA NA POLU BEZ ROŚLIN I Z POKRYWĄ ROŚLINNĄ

J. Kossowski

Instytut Agrofizyki PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27

Streszczenie: W oparciu o wyniki pomiarów przeprowadzonych równoległe na polach pszenicy ozimej, koniczyny czerwonej i bez roślin w Felinie koło Lublina dokonano porównania przebiegu gęstości strumienia ciepła w glebie (G), wartości bilansu promieniowania (R_n) oraz stosunku G/R_n na tych polach podczas pogodnych dni letnich. Zestawiono i analizowano wartości stosunku G/R_n obliczone dla różnych przedziałów czasowych w ciągu dnia (od wschodu do zachodu słońca), szczególną uwagę zwracając na relację sum dodatnich wartości strumienia ciepła w glebie (skierowanego od powierzchni w głąb gleby) do sum dodatnich wartości bilansu promieniowania (sG^+/sR_n^+). Przedstawione w pracy wyniki dokumentują wpływ obecności i rodzaju pokrywy roślinnej tak na wartości strumienia ciepła wnিকającego do gleby i bilansu promieniowania, jak i ich stosunku. Zróznicowanie tych wartości między polami o zupełnie różnym charakterze powierzchni czynnej (pole bez roślin i z pokrywą roślinną) było bardzo wyraźne, ale zaznaczyło się również w przypadku pól pokrytych zwartym łanem roślin (pszenica w fazie kłoszenia, koniczyna wchodząca w fazę kwitnienia).

Słowa kluczowe: strumień ciepła w glebie, bilans promieniowania, struktura bilansu cieplnego

WSTĘP

Badania struktury bilansu cieplnego powierzchni czynnej mają na celu określenie ilościowych powiązań i zależności między poszczególnymi składnikami tego bilansu. Generalnie rzecz biorąc, uwzględnia się w nim - po stronie przychodów - bilans (saldo) promieniowania (R_n), a w części rozchodowej - strumień ciepła utajonego w procesie ewapotranspiracji (LE), strumień ciepła

jawnego przekazywany do atmosfery (H) oraz wymianę ciepła z podłożem (G):

$$Rn - LE - H - G = 0 \quad (1)$$

Wartości składowych bilansu cieplnego jak i relacje między nimi zależą od warunków klimatycznych i topografii miejsca (terenu) badań, pory roku i dnia, typu i zmian pogody w danym dniu oraz rodzaju środowiska (ekosystemu), stanowiącego o charakterze i własnościach powierzchni lub warstwy czynnej [6,8,17,20,22,26,30,31,32,34,36,37]. W przypadku pól uprawnych (agroekosystemów) istotne znaczenie ma w tym względzie obecność, rodzaj i stadium rozwoju szaty roślinnej. Gdy powierzchnię czynną stanowi jedynie powierzchnia gleby, na strukturę bilansu cieplnego ma wpływ jej ukształtowanie (mikrorelief) oraz właściwości fizyczne gleby [1,2,16,25]. W miarę wzrostu pokrycia gleby przez rośliny, wymiana ciepła z glebą odgrywa coraz mniejszą rolę w kształtowaniu struktury bilansu cieplnego, chociaż pozostaje znacząca nawet przy maksymalnie rozwiniętej szacie roślinnej [4,5,27].

W pełni okresu wegetacyjnego i przy co najmniej dostatecznym uwilgotnieniu gleby, największą rozchodową składową bilansu cieplnego powierzchni czynnej pól uprawnych stanowi ciepło zużyte na parowanie. Stosunek LE/Rn obliczany z wartości dobowych na polach z różnymi roślinami wynosi przeważnie 0,6 – 0,9 [3,6,13,19,21,28], ale w określonych warunkach atmosferycznych może być nawet większy od 1 [20,31,38]. Wymiana ciepła z glebą jest wówczas niewielka (G/Rn z reguły poniżej 0,1), a niekiedy może stanowić przychodową składową bilansu (i częściowo rekompensować niedobory energii przy intensywnym parowaniu). Zupełnie inaczej kształtuje się struktura bilansu cieplnego w przypadku pozbawionej roślinności, a przy tym słabo nawilgotnionej (przesuszonej) gleby, kiedy to ciepło zużyte na parowanie stanowić może najmniejszą rozchodową składową bilansu, a stosunek G/Rn w okresie dziennym osiągać wartości dochodzące do 0,4 - 0,5 [11,13,35].

Często spotykana w krajobrazie rolniczym mozaika pól z uprawą różnych roślin sprawia, iż w obrębie niewielkiego nawet obszaru zróżnicowanie charakteru powierzchni czynnej może być bardzo duże. Różnorodność powierzchni czynnej – wobec tych samych warunków atmosferycznych – jest wtedy jedynym powodem zróżnicowania struktury bilansu cieplnego, a prowadzenie równoległych pomiarów na wybranych polach daje możliwość określenia wielkości tego zróżnicowania. W niniejszej pracy przedstawione zostaną niektóre wyniki uzyskane podczas badań przeprowadzonych w takich właśnie warunkach, odnoszące się do dwóch składowych bilansu cieplnego powierzchni czynnej: wymiany ciepła z glebą i bilansu promieniowania.

OBIEKT I METODY BADAŃ

W pracy wykorzystano część materiałów obserwacyjnych uzyskanych w trakcie pomiarów przeprowadzonych w sezonie wegetacyjnym 1978 i 1979 roku na tzw. polach ustalonych przy Obserwatorium Agrometeorologicznym w Felinie koło Lublina. Gleba określana jako lessopodobna (orthic luvisol), pylasta, wykazywała tendencję do zaskorupiania się pod wpływem opadów. Dokładną jej charakterystykę przedstawiono w innych pracach [7,39].

Bilans promieniowania na poszczególnych polach mierzono za pomocą bilansomierzy typu CN-1 australijskiej firmy Middleton Instruments, umieszczonych na wysokości 1,5 m nad powierzchnią gleby bądź łanem roślin. Przy określaniu gęstości strumienia ciepła w glebie wykorzystywano dwie odrębne metody. Bezpośrednie pomiary prowadzono przy użyciu płytek – strumieniomierzy ciepła (produkcji Middleton Instruments), połączonych szeregowo w zestawy po 2 lub 3 płytki. Instalowano je na początku każdego sezonu na głębokości 1 cm pod powierzchnią gleby, tuż obok punktu pomiaru temperatury gleby. Należy zaznaczyć, że w przypadku pól z uprawą roślin wysiewanych rzędowo (jak np. pszenicy), jedną z płytek umieszczano w rzędki roślin, a drugą między rzędkami. Drugą metodą, pośrednią, strumień ciepła na poziomie $z = 1$ cm wyznaczany był następująco:

$$G = \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^N Q_i + q_{z=20} \quad (2)$$

gdzie Q_i oznacza zmianę zawartości ciepła w i – tej warstwie gleby pomiędzy poziomem 1 a 20 cm w czasie Δt ; N – ilość wydzielonych warstw; $q_{z=20}$ – średni strumień ciepła na poziomie $z = 20$ cm obliczany jako iloczyn przewodnictwa cieplnego i średniego gradientu temperatury gleby w dwóch kolejnych terminach obserwacyjnych. Zmiany zawartości ciepła w danej warstwie określano na podstawie wartości objętościowej pojemności cieplnej (C_v) i zmian temperatury gleby (ΔT):

$$Q_i = C_{v_i} \cdot \Delta T_i \cdot h_i \quad (3)$$

przy czym miąższość warstwy (h) wynikała z różnicy głębokości na jakich dokonywano pomiarów temperatury gleby (1, 5, 10, 15, 20 oraz 30 i 50 cm). Objętościową pojemność cieplną oraz przewodnictwo cieplne gleby wyznaczano według modelu de Vriesa [40].

Wartości gęstości strumienia ciepła w glebie uzyskiwane ze strumieniomierzy dla kolejnych jedno- lub półgodzinnych przedziałów czasowych w ciągu doby na

danym polu różniły się (były systematycznie mniejsze) w porównaniu do otrzymywanych metodą obliczeniową, a ponadto wielkość różnic zmieniała się z dnia na dzień. Przyczyny takich rozbieżności oraz sposoby korekty wyników otrzymywanych przy użyciu płytek – strumieniometry ciepła, to odrębne, niejednokrotnie już poruszane zagadnienie [9,10,14,29,33]. W rezultacie przeprowadzonych porównań i analiz [24], przy opracowywaniu danych dotyczących przebiegu dobowego strumienia ciepła w glebie na danym polu i w poszczególnym dniu zdecydowano się stosować równania regresji liniowej korygujące dane ze strumieniometry względem uzyskanych metodą obliczeniową.

Materiał jakim posługiwano się w dalszych obliczeniach i przy prezentowaniu wyników pomiarów stanowiły średnie z okresów półgodzinnych wartości bilansu promieniowania i strumienia ciepła w glebie w danym dniu. Rozpatrywano okresy dzienne (od wschodu do zachodu słońca), szczególną uwagę zwracając na ilości ciepła wnikającego do gleby (tj. sumy dodatnich – skierowanych w głąb gleby – wartości strumienia ciepła) i ich relację do sum dodatnich (per saldo - skierowanych ku powierzchni czynnej) wartości bilansu promieniowania na danym polu.

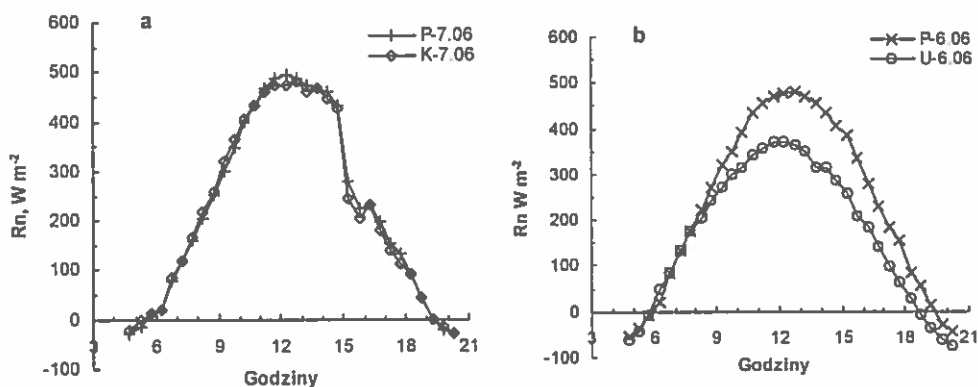
WYNIKI

Przedstawione w niniejszej pracy wyniki porównawczych pomiarów bilansu promieniowania i strumienia ciepła w glebie odnoszą się do pól z uprawą pszenicy ozimej i koniczyny czerwonej (sezon 1978) oraz pszenicy i bez roślin (sezon 1979). Wyboru pól dokonano mając na uwadze zróżnicowanie charakteru ich powierzchni czynnej: 1 – przy braku i obecności pokrywy roślinnej, 2 – w przypadku uprawy roślin tworzących łąny o odmiennej budowie (pokroju). Odmienność cech łąnów roślin oraz kontrast między powierzchnią gólej a pokrytej roślinnością gleby zaznacza się najwyraźniej w pełni okresu wegetacyjnego, gdy łąny są już w charakterystyczny dla danego gatunku sposób ukształtowane, o dużej zielonej masie i wysokości roślin. Z tego względu, relacje między strumieniem ciepła w glebie a bilansem promieniowania na poszczególnych polach omówiono w oparciu o dane zebrane w pierwszej połowie czerwca, kiedy pszenica znajdowała się w fazie kłoszenia, koniczyna wchodziła w fazę kwitnienia, a wysokość roślin wynosiła 68 – 88 cm. Mając ponadto na uwadze określony wpływ warunków atmosferycznych na pojedyncze składowe jak i strukturę bilansu cieplnego, do analizy wybrano dni bezopadowe, w znacznej

części bezchmurne lub o niewielkim zachmurzeniu oraz ze słabym wiatrem (Tab.1), a tym samym o warunkach pogodowych sprzyjających kształtowaniu się wyraźnego przebiegu bilansu promieniowania i strumienia ciepła w glebie w cyklu dobowym.

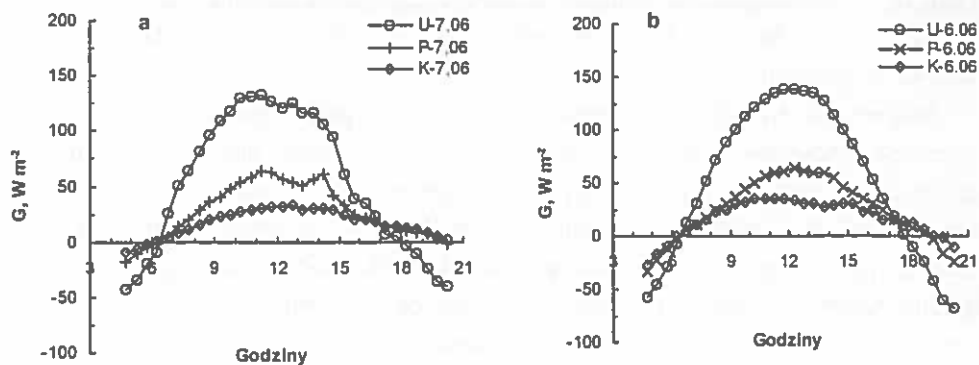
Porównanie wartości bilansu promieniowania w przebiegu dziennym na polu pszenicy i koniczyny oraz pszenicy i bez roślin, a także przebiegu dziennego gęstości strumienia ciepła w glebie (na głębokości 1 cm) na tych polach, umożliwiają wykresy przedstawione na rysunkach 1 i 2. Stanowią one przykład dobrze ilustrujący zróżnicowanie tych składowych bilansu cieplnego pomiędzy polami uprawnymi podczas pogodnych letnich dni, a mianowicie:

- występowanie mniejszych wartości strumienia ciepła w glebie (G) na polu koniczyny niż na polu pszenicy, mimo iż wartości bilansu promieniowania (R_n) na obu polach były zbliżone;
- występowanie zdecydowanie większych wartości G , a jednocześnie mniejszych wartości R_n na polu bez roślin niż na polach pokrytych roślinami;
- różną długość okresów w jakich notowane są dodatnie wartości R_n i G – mniejszą na polu bez roślin niż na polach z pokrywą roślinną.



Rys.1. Przebiegi dzienne bilansu promieniowania (R_n) na polu pszenicy (P) i koniczyny (K) w dniu 7.06.1978 (a) oraz na polu pszenicy (P) i bez roślin (U) w dniu 6.06.1979 (b).

Fig.1. Daily course of net radiation (R_n) over wheat field (P) and clover field (K) in 7.06.1978 (a), as well as on wheat field (P) and bare soil (U) in 6.06.1979 (b).



Rys.2. Przebiegi dzienne gęstości strumienia ciepła w glebie (G) na polu pszenicy (P), koniczyny (K) i bez roślin (U) w dniu 7.06.1978 (a) i 6.06.1979 (b).

Fig.2. Daily course of soil heat flux density (G) on wheat field (P.), clover field (K) and bare soil (U) in 7.06.1978 (a) and 6.06.1979 (b).

Powyższe spostrzeżenia odnośnie wartości bilansu promieniowania na rozpatrywanych polach potwierdzają dane dotyczące sum dodatnich wartości R_n zamieszczone w tabeli 2, jak i w innej (uwzględniającej szerszy materiał obserwacyjny) pracy [23]. Na polu pszenicy i koniczyny sumy te (sR_n^+) były niemal identyczne, podczas gdy na polu bez roślin stanowiły około 0,8 notowanych na polu pszenicy. Tymczasem stosunek sum dodatnich wartości strumienia ciepła w glebie (sG^+) na polu pszenicy do tychże sum na polu koniczyny wynosił 1,5–1,8, a w zestawieniu pole bez roślin / pole pszenicy - około 2,2.

Odpowiednio do wykazanego zróżnicowania bilansu promieniowania i gęstości strumienia ciepła w glebie na rozpatrywanych polach uprawnych kształtowały się wartości stosunku G/R_n (Tab. 2). Biorąc pod uwagę sumy dodatnich wartości G i R_n w poszczególnych dniach stwierdzono, że był on najmniejszy na polu koniczyny (około 0,08), na polu pszenicy 1,6 i 1,8 razy większy niż na polu koniczyny, a na polu bez roślin 2,6 i 3 razy większy niż na polu pszenicy.

Różnice stosunku G/R_n między polem pszenicy a koniczyny wynikały przede wszystkim z niejednakowej wymiany ciepła z glebą na tych polach podczas okresu dziennego. Mniejszą jej wielkość na polu koniczyny należy wiązać z bardziej

Tabela 1. Charakterystyka warunków atmosferycznych w omawianych dniach badań: U_r – usłonecznienie rzeczywiste; N – średnie zachmurzenie w skali 1-10 i rodzaj chmur; T – średnia dzienna temperatura powietrza; W_p – wilgotność względna powietrza; v – prędkość wiatru

Table 1. Weather conditions during analysed days: U_r – sunshine duration (hours); N – mean cloudiness and type of clouds; T – mean air temperature; W_p – mean air humidity; v – mean wind speed

Data	U_r (godz.)	N – rodzaj chmur	T (°C)	W_p (%)	v (m s ⁻¹)
6.06.78	8,0	6,0 – Ci,Ac,Cu	20,4	64	1,0
7.06.78	12,3	3,3 – Cu	21,2	72	3,3
6.06.79	13,4	0,3 – Ci,Cu	21,7	56	2,0
12.06.79	8,4	4,0 – Ci,As,Cu	21,3	59	1,0

Tabela 2. Stosunek wartości strumienia ciepła w glebie do bilansu promieniowania (G/R_n) na rozpatrywanych polach uprawnych obliczony na podstawie: a) sum wartości dodatnich G i R_n w danym dniu, b) wartości w 3 godzinach okołopołudniowych, c) wartości w okresie od wschodu do zachodu słońca. Ponadto - sumy dodatnich wartości R_n (sR_n^+) oraz dane dotyczące średniej wysokości łanu roślin (h_r) i wilgotności przypowierzchniowej (0-5 cm) warstwy gleb (W_g)

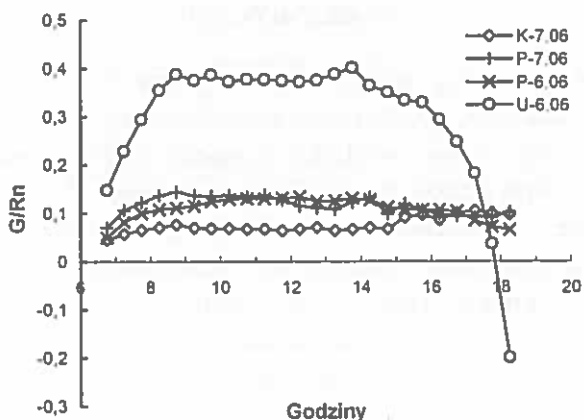
Table 2. The ratio of soil heat flux to net radiation (G/R_n) on investigated fields calculated on the base data: a) sums of positive values G and R_n during a day, b) values G and R_n for three midday hours, c) values for period from sunrise to sunset. In addition, the sums of positive values R_n (sR_n^+) and data concerning the mean high of plants (h_r) and topsoil (0-5 cm) water content (W_g) are presented

Pole	Data	G/R_n			sR_n^+ (J cm ⁻²)	h_r (cm)	W_g (m ³ m ⁻³)
		a	b	c			
Koniczyna	6.06.78	0,081	0,069	0,076	1082	68	0,143
	7.06.78	0,077	0,067	0,075	1316	70	0,130
Pszenica	6.06.78	0,147	0,142	0,139	1083	75	0,131
	7.06.78	0,121	0,120	0,118	1340	77	0,125
Pszenica	6.06.79	0,117	0,129	0,104	1396	75	0,099
	12.06.79	0,139	0,151	0,131	1177	88	0,064
Bez roślin	6.06.79	0,345	0,382	0,300	1046	-	0,156
	12.06.79	0,357	0,395	0,324	987	-	0,136

ograniczonym dopływem promieniowania słonecznego do powierzchni gleby (przy większej zwartości roślin w łanie). Współczynnik transmisji promieniowania słonecznego poprzez łan zboża w fazie kłoszenia i kwitnienia kształtuje się na poziomie kilkunastu procent, podczas gdy w przypadku roślin tworzących baldachim kompletnie przysłaniający glebę (ziemniaki, a tym bardziej koniczyna) – tylko kilka procent [28].

Należy podkreślić, że wartości stosunku G/R_n obliczane na podstawie danych dotyczących różnych przedziałów czasowych, takich jak okres występowania dodatnich wartości R_n , okres dzienny (od wschodu do zachodu słońca) czy dobowy, z reguły znacznie odbiegają od siebie. Wiąże się to z występowaniem od godzin przedwieczornych do rannych następnego dnia odwrotnie niż za dnia ukierunkowanych strumieni R_n i G (o wartościach ujemnych). Uwzględnianie ich powoduje nie tylko obniżenie średnich wartości (czy sum) danego strumienia, ale i wartości stosunku G/R_n określanych dla tych coraz dłuższych okresów w ciągu doby. Dla przykładu: stosunek G/R_n na polu pszenicy w dniu 6.06.1978 obliczony dla okresu z występowaniem dodatnich wartości tych strumieni (około 13 godzin) wynosił 0,147, dla okresu dziennego (16 godzin) 0,139, a dla całej doby tylko 0,094. Trzeba przy tym zaznaczyć, że stosunek G/R_n podczas godzin okołopołudniowych może wykazywać większe wartości (Tab. 2).

Zróżnicowanie stosunku G/R_n w przebiegu dziennym na rozpatrywanych polach uprawnych ilustruje rysunek 3. Na polu bez roślin, oprócz zdecydowanie większych wartości stosunku, zwraca uwagę gwałtowny ich wzrost w godzinach rannych (na polach pokrytych roślinami jest on łagodniejszy) oraz wcześniejszy spadek do zera przed wieczorem. Różnice te znajdują wytłumaczenie w stymulującej roli pokrywy roślinnej, zwłaszcza w odniesieniu do strumienia ciepła w glebie: powoduje ona nie tylko generalne osłabienie wymiany ciepła z glebą, ale i opóźnia zmiany w czasie. Szczególnie wyraźnie zaznacza się to w późnych godzinach popołudniowych, kiedy to na polu bez roślin wartości strumienia ciepła w glebie obniżają się do zera lub zmieniają znak (jak w pokazanym przykładzie, przy niewielkich lecz jeszcze dodatnich wartościach R_n), natomiast w glebie z łanem roślin pozostają nadal dodatnie. Warto dodać, że podobnie duże zróżnicowanie wartości stosunku G/R_n w przebiegu dziennym między glebą bez roślin a z roślinami (lucerną, bawełną) stwierdzone było w pomiarach przeprowadzonych koło Phoenix (Arizona, USA) podczas kilku dni czerwcowych [27]. Maksymalne w ciągu dnia wartości G/R_n (średnie półgodzinne) na polu bez roślin osiągały 0,38-0,46 (między godz. 8 a 9), a na polu lucerny tylko 0,16-0,23 (około południa).



Rys. 3. Wartości stosunku G/R_n na polu bez roślin (U) i pszenicy (P) w dniu 6.06.1969 oraz na polu pszenicy (P) i koniczyny (K) w dniu 7.06.1978 podczas godzin dziennych (gdy obserwowano dodatnie wartości R_n).

Fig.3. Values of G/R_n ratio on bare soil (U) and wheat field (P) in 6.06.1979, as well as on wheat field (P) and clover field (K) in 7.06.1978 during most of the daylight hours (when the positive values of R_n occurred).

Przytaczane w literaturze wyniki badań na polach pszenicy (z podaniem wartości stosunku G/R_n lub danych umożliwiających jego obliczenie) są na ogół zbliżone do przedstawionych w niniejszej pracy, pomimo niejednakowych zapewne cech łąnów. W pomiarach przeprowadzonych koło New Delhi (Indie) podczas kłoszenia i pylenia pszenicy otrzymano G/R_n w okresie dziennym wynoszące odpowiednio 0,10 i 0,06, choć wartości te mogą być zaniżone z uwagi na pomiar strumienia ciepła w glebie nie przy powierzchni lecz na głębokości 5 cm [12]. Wartość 0,07 dla G/R_n w okresie dziennym (średnia dla kilku dni, przy wysokości roślin około 45 cm), uzyskano w pomiarach koło Canberry (Australia) [6]. W rejonie Turwi (Nizina Wielkopolska) podczas pogodnego dnia w połowie maja, gdy wysokość pszenicy wynosiła 55 cm, stosunek G/R_n obliczony dla okresu dziennego wynosił 0,23, a dla okresu doby 0,11 [18, 21]. Spośród danych literaturowych odnoszących się do gleby bez roślin najbliższa wynikom zawartym w Tab. 2 okazała się wartość stosunku G/R_n (0,31) określona dla okresu dziennego w pogodnym dniu sierpniowym w Turwi [19,21]. Nieco mniejsze wartości G/R_n otrzymywano w innych badaniach [1,8,30], a przy tym wykazywały one duży rozrzut w wyniku zróżnicowania stanu fizycznego gleby (w tym wilgotności) i warunków atmosferycznych w trakcie pomiarów.

PODSUMOWANIE

Przedstawione w pracy wyniki - uzyskane w trakcie równoległych pomiarów na polu bez roślin oraz polach z uprawą pszenicy ozimej i koniczyny czerwonej – dokumentują zróżnicowanie wielkości wymiany ciepła z glebą (G), bilansu promieniowania (Rn), a także relacji G/Rn występujące w tym samym czasie na polach uprawnych. Zróżnicowanie to związane jest z charakterem powierzchni (warstwy) czynnej pól, toteż zaznacza się bardzo wyraźnie między polami o zupełnie różnym charakterze (jak pole bez roślin i z dobrze rozwiniętą pokrywą roślinną), ale również, choć w znacznie mniejszym stopniu, w przypadku upraw różnego rodzaju roślin (pszenica, koniczyna).

Odpowiednio do przebiegu gęstości strumienia ciepła w glebie i wartości bilansu promieniowania na poszczególnych polach, również wartości stosunku G/Rn wykazują wyraźny i różniący się między polami przebieg dzienny (dobowy). Stąd przy obliczaniu tego stosunku dla różnych przedziałów czasowych (godziny okołopołudniowe, okres dzienny, doba) otrzymuje się znacznie odbiegające od siebie wartości. Dokonując analizy wyników uznano za celowe zwrócenie baczniejszej uwagi na stosunek sum dodatnich wartości tych strumieni, jako że określa on rzeczywistą proporcję między ilością ciepła zużytą na ogrzewanie gleby, a ilością energii dostępnej (i rozchodowanej w tym i innych procesach) w danym dniu. Otrzymane dane liczbowe dotyczące udziału tego rodzaju wymiany ciepła z glebą w bilansie energii (12-15% na polu pszenicy, 8% na polu koniczyny i około 35% na polu bez roślin) są charakterystyczne dla pogodnych letnich dni i świadczą o wpływie obecności oraz rodzaju pokrywy roślinnej na kształtowanie się struktury bilansu cieplnego na polach uprawnych.

PIŚMIENNICTWO

1. Allmaras R.R., Hallauer E.A., Nelson W.W., Evans S.D.: Surface energy balance and soil thermal property modifications by tillage – induced soil structure. Agric.Exp.Sta.Univ. Minnesota Techn.Bull., 306, 1-40, 1977.
2. Boruszko I.S.: Wlianie oroszenija na tieploobmien w poczwie.(w j.ros.) Trudy GGO, 37(99), 3-6, 1952.
3. Brown K.W., Rosenberg N.J.: Energy and CO₂ balance of an irrigated sugar beet (*Beta vulgaris*) field in the Great Plains. Agron.J., 63, 207-213, 1971.

4. Choudhury B.J., Idso S.B., Reginato R.J.: Analysis of an empirical model for soil heat flux under a growing wheat crop for estimating evaporation by infrared – temperature based energy balance equation. *Agric.For.Meteorol.*, 39, 283-297, 1987.
5. Clothier B.E., Clawson K.L., Pinter P.J., Moran M.S., Reginato R.J., Jackson R.D.: Estimation of soil heat flux from net radiation during the growth of alfalfa. *Agric.For.Meteorol.*, 37, 319-329, 1986.
6. Denmead O.T.: Comparative micrometeorology of a wheat field and a forest of *Pinus radiata*. *Agric. Meteorol.*, 6, 357-371, 1969.
7. Dobrzański B., Zawadzki S.: Gleby Zakładu Naukowo - Doświadczalnego Felin. *Ann.UMCS, s.E*, 6, 231-252, 1952.
8. Enz J.W., Brun L.J., Larsen J.K.: Evaporation and energy balance for bare and stubble covered soil. *Agric.For.Meteorol.*, 43, 59-70, 1988.
9. Fan A.A.: O graduirówce teplomierow w jestestwiennych usłowijach. (w j. ros.) *Trudy GGO*, 214, 48-62, 1967.
10. Fuchs M., Hadas A.: Analysis of the performance of an improved soil heat flux transducer. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 37, 173-175, 1973.
11. Fuchs M., Tanner C.B.: Calibration and field test of soil heat flux plates. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 32, 326-328, 1968.
12. Gupta P.L., Sastry P.S.N.: Estimating evapotranspiration from midday canopy temperature. *Irrig. Sci.*, 7, 237-241, 1986.
13. Ham J.M., Heilman J.L., Lascano R.J.: Soil and canopy energy balances of a row crop at partial cover. *Agron.J.*, 83, 744-753, 1991.
14. Hogstrom U.: In situ calibration of ground heat flux plates. *Agric. Meteorol.*, 13, 161-169, 1974.
15. Hurlalova T.: Evaporative flux ratio over rye canopy surface. 116-121 in: T.Hurlalova (ed.) - *Proc. Int. Conf. Meteorological processes in the boundary layer of the atmosphere*, Stara Lesna, Slovakia, 7-11 October 1996.
16. Idso S.B., Aase J.K., Jackson R.D.: Net radiation – soil heat flux relations as influenced by soil water content variations. *Bound.Layer Meteorol.*, 9, 113-122, 1975.
17. Kapuściński J., Kędziora A.: Porównanie warunków termicznych gleby w ewaporometrze, na polu i łące. *Zesz.Probl.Post.Nauk Roln.*, 322, 195-210, 1987.
18. Kapuściński J., Moczko J.: Udział strumienia ciepła w glebie w strukturze bilansu cieplnego powierzchni czynnej. *Zesz.Nauk. AR Kraków*, 246, 117-129, 1990.
19. Kędziora A., Kapuściński J., Moczko J., Olejnik J., Karliński M.: Struktura bilansu cieplnego pola lucerny. *Roczn. AR Poznań, Melioracje*, 201, 31-39, 1989.
20. Kędziora A., Kapuściński J., Olejnik J., Moczko J., Tuchołka S., Leśny J.: Geograficzna zmienność struktury bilansu cieplnego. *Roczn. AR Poznań*, 257, 175-194, 1994.

21. Kędziora A., Olejnik J.: Heat balance structure in agroecosystems. 45-64 in: L. Ryszkowski, N.R.French, A. Kędziora (eds) – Dynamics of an agricultural landscape. PWRiL, Poznań 1996.
22. Konstantinova T.S., Boloban I., Paszyński J., Krawczyk B.: Przestrzenna i czasowa zmienność składników bilansu cieplnego w terenie o pagórkowatej rzeźbie. Zesz. IGPZ PAN, 26, 5-19, 1994.
23. Kossowski J.: Bilans promieniowania na polu pszenicy, koniczyny i bez roślin w relacji do całkowitego promieniowania słonecznego. Acta Agroph., 34, 89-100, 2000.
24. Kossowski J.: Porównanie gęstości strumienia ciepła w glebie określonej metodą bezpośrednią i obliczeniową. Spraw. MR II.8.02.8, Inst. Agrofizyki PAN, Lublin 1979.
25. Kossowski J.: Response of soil heat flux to soil compaction. 127-131 in: T.Hurtalova (ed.) – Proc. Int. Conf. Meteorological processes in the boundary layer of the atmosphere, Stara Lesna, Slovakia, 7-11 October 1996.
26. Kossowski J.: Strumień i akumulacja ciepła w glebie podczas dni o różnych warunkach atmosferycznych. 44-47 w: R.Walczak, B.Usowicz – Modelowanie i monitorowanie procesów agrofizycznych w środowisku glebowym. PTA, Lublin 1999.
27. Kustas W.P., Daughtry G.S.T.: Estimation of the soil heat flux / net radiation ratio from spectral data. Agric.For.Meteorol., 49, 205-223, 1989.
28. Lykowski B., Radomski C., Kossowski J.: Radiation and heat balance of agrocenoses. Pol.Ecol.Stud., 6, 113-128, 1980.
29. Mogensen V.O.: The calibration factor of heat flux meters in relation to the thermal conductivity of the surrounding medium. Agric. Meteorol., 7, 401-416, 1970.
30. Oliver S.A., Oliver H.R., Wallace J.S., Roberts A.M.: Soil heat flux and temperature variation with vegetation, soil type and climate. Agric.For.Meteorol., 39, 257-269, 1987.
31. Paszyński J., Kędziora A., Tucholka S., Kapuściński J., Olejnik J.: Wpływ rodzaju powierzchni czynnej na strukturę bilansu cieplnego. IGPZ PAN, Conf.Papers 23, 69-92, 1995.
32. Paszyński J., Skoczek J.: Struktura bilansu cieplnego upraw rolniczych. Roczn. AR Poznań, CCI, 25-30, 1989.
33. Philip J.R.: The theory of heat flux meters. J. of Geoph. Res., 66, 571-579, 1961.
34. Sakali L.I.: Teplovoj balans Ukrainy i Moldavii (w j.ros.). Gidromet. Izd., Leningrad 1970.
35. Skoczek J.: Struktura bilansu cieplnego powierzchni czarnoziemiu (na przykładzie badań ekspedycyjnych w Moldawii). Zesz. IGPZ PAN, 26, 21-39, 1994.
36. Tamulewicz J.: Wstępne wyniki badań bilansu promieniowania powierzchni użytkowanych rolniczo w okolicy Turwi. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 322, 137-162, 1987.
37. Tamulewicz J., Woś A.: Radiation characteristics of agricultural landscapes. 27-36 in: L.Ryszkowski, N.R.French, A.Kędziora (eds.) – Dynamics of an agricultural landscape. PWRiL, Poznań 1996.

38. Tanner C.B.: Energy balance approach to evapotranspiration from crops. Soil Sci.Soc.Am.Proc., 24, 1-9, 1960.
39. Urowicz B., Kossowski J., Baranowski P.: Spatial variability of soil thermal properties in cultivated fields. Soil Tillage Res., 39, 85-100, 1996.
40. Vries de D.A.: Thermal properties of soil. 210-235 in: W.R. van Wijk (ed.) – Physics of plant environment. North-Holland Publ.Co., Amsterdam, 1963.

THE RELATION BETWEEN SOIL HEAT FLUX AND NET RADIATION ON CULTIVATED FIELDS WITH AND WITHOUT PLANT COVER

J. Kossowski

Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27

Summary: Comparison of daily course of soil heat flux (G), net radiation (R_n) and ratio G/R_n values on fields with winter wheat and red clover and on bare soil is presented in the paper. The simultaneous measurements of G and R_n fluxes were carried out during chosen sunny summer days on the experimental fields at Felin near Lublin. The values of G/R_n ratio were analyzed for different time ranges from sunrise to sunset, with special regard to the ratio of sums of positive soil heat flux (directed into soil) to positive net radiation ($sG+/sR_n+$). Results showed the influence of different types of vegetation and its absence on the soil heat flux, net radiation and their ratio. Differentiation of these values was very distinct between the fields of various active surface characters (with and without plant cover). However, it was also observed in the case of high and compacted plant cover (wheat in the stage of heading and clover at flowering).

Keywords: soil heat flux, net radiation, heat balance structure