

O RELACJI MIĘDZY STRUMIENIEM CIEPŁA W GLEBIE A PROMIENIOWANIEM SŁONECZNYM

Jan Kossowski

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin
e-mail: jkoss@demeter.ipan.lublin.pl

Streszczenie. W oparciu o wyniki pomiarów przeprowadzonych podczas 42 dni bezopadowych w okresie wiosenno-letnim na polach doświadczalnych w Felinie koło Lublina analizowano przebiegi dzienne gęstości strumienia ciepła w glebie bez roślin w relacji do natężenia całkowitego promieniowania słonecznego, a także związek między sumami dodatnich wartości strumienia ciepła w glebie (wnikającego do niej w ciągu dnia) a sumami dobowymi promieniowania słonecznego i podstawowymi elementami meteorologicznymi. Stwierdzono, że stosunek wartości strumienia ciepła wnikałego do gleby do wartości promieniowania słonecznego zmienia się w przeciągu dnia w charakterystyczny sposób, jest większy w godzinach przedpołudniowych (z maksimum rzędu 0,25-0,3) niż popołudniowych, natomiast stosunek sumy dodatnich wartości strumienia ciepła w glebie do sumy promieniowania słonecznego kształtował się w rozpatrywanych dniach między 0,09 a 0,29 (średnio wynosił 0,18). Otrzymał równanie opisujące zależność między ilością ciepła wnikałego do gleby podczas dnia a sumą promieniowania słonecznego (wsp. determinacji 0,67) trudno jednak uznać za wystarczająco użyteczne do szacowania tych sum strumienia ciepła w glebie.

Słowa kluczowe: strumień ciepła w glebie, całkowite promieniowanie słoneczne, dni bezopadowe

WSTĘP

Proces dopływu, transformacji i wymiany energii zachodzący na powierzchni czynnej jest głównym czynnikiem kształtującym stosunki termiczne podłoża atmosfery (gleby) i przygruntowej warstwy powietrza w danym środowisku. O ilości energii potencjalnie dostępnej i rozchodowanej w określonym przedziale czasu na tej powierzchni stanowią wartości bilansu promieniowania (Rn), co w generalnym ujęciu wyraża równanie bilansu cieplnego:

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

gdzie: LE oznacza ilość ciepła zużyta na parowanie, H – oddaną do atmosfery, a G – wymianę ciepła z glebą. Należy zaznaczyć, że wartości G mogą stanowić

bądź rozchodową składową tego równania (za dnia, gdy strumień ciepła przeważnie skierowany jest od powierzchni w głąb gleby), bądź też przychodową (nocą, przy odwrotnym kierunku strumienia ciepła w glebie).

Bilans (saldo) promieniowania – rozumiany jako różnica skierowanych do i od powierzchni czynnej strumieni promieniowania w zakresie krótkofalowym (R_k) i długofalowym (R_d) – cechuje również okresowość zmian w cyklu dobowym, tj. może on przyjmować wartości dodatnie bądź ujemne. W okresie dziennym, przy na ogół ujemnym R_d , o dodatnich wartościach bilansu promieniowania (R_n) decyduje docierająca do powierzchni czynnej ilość energii w postaci krótkofalowego promieniowania słonecznego bezpośredniego i rozproszonego (łącznie), określanego jako całkowite promieniowanie słoneczne (Q_s). Jednak ile z tego promieniowania będzie faktycznie dostępne i wykorzystane na ogrzewanie gleby i powietrza oraz parowanie, zależy od wielkości albedo (α), tj. stosunku promieniowania odbitego do padającego na powierzchnię czynną:

$$R_n = R_k + R_d = (1 - \alpha)Q_s + R_d \quad (2)$$

Udział wymiany ciepła z glebą w rozchodowej części bilansu cieplnego (stosunek G/R_n) w danym dniu jak i w dłuższych okresach określany był wielokrotnie w ramach badań struktury bilansu cieplnego różnych powierzchni naturalnych, także pól uprawnych (Clothier i in. 1986, Grzybowski i Itier 1984, Ham i in. 1991, Kapuściński i Moczko 1990, Kędziora i in. 1989, Skoczek 1970), w tym gleby bez roślin (Allmaras i in. 1977, Enz i in. 1988, Fuchs i Hadas 1972, Idso i in. 1975, Skoczek 1994). Mniej natomiast zajmowano się relacją wymiana ciepła z glebą – całkowite promieniowanie słoneczne (G/Q_s), która – choć dotyczy jedynie okresu dziennego – wydaje się niemniej istotną informacją. Między innymi, podobnie jak wartość stosunku G/R_n , może być wykorzystywana do szacowania wartości G dla określonej powierzchni czynnej. Według Skoczka (1994), przebieg dzienny strumienia ciepła w glebie jest niekiedy bardziej powiązany ze zmianami promieniowania słonecznego niż bilansu promieniowania. Należy też mieć na uwadze, że wartości R_n rejestrowane jednocześnie ponad różnymi powierzchniami czynnymi są odmienne (Eulenstein i in. 2005, Kossowski 2001a, Kustas i Daughtry 1990), podczas gdy dopływającego do tych powierzchni promieniowania słonecznego – takie same. Nie bez znaczenia jest również fakt, że wartości Q_s są łatwiej mierzalne i dostępne niż R_n .

Odnoszenie wartości strumienia ciepła w glebie do promieniowania słonecznego było już z powodzeniem stosowane w badaniach porównawczych mających na celu wykazanie wpływu obecności, rodzaju i stadium rozwoju roślin na wymianę ciepła z glebą (Karpieńska 1985, Kossowski i Sikora 1976, 1977), czy wpływu na wielkość tej wymiany właściwości fizycznych gleby (Kossowski 1996). Nato-

miast prezentowane w niniejszym opracowaniu badania wymiany ciepła z glebą i jej relacji do całkowitego promieniowania słonecznego (G/Q_s) przeprowadzono głównie pod kątem analizy wpływu warunków atmosferycznych panujących w danym dniu na kształtowanie się tej relacji. Mając na względzie, że szata roślinna ogranicza dopływ promieniowania słonecznego do powierzchni gleby (coraz bardziej w miarę rozwoju roślin), a jednocześnie powoduje zmienność czasową i przestrzenną warunków środowiskowych dokonywania się wymiany ciepła w glebie, za najbardziej stosowny obiekt dla tego typu badań przyjęto pole z glebą odsłoniętą (bez roślinności).

Celem pracy jest przedstawienie charakterystycznych cech przebiegu dziennego gęstości strumienia ciepła w glebie (tuż przy jej powierzchni) w relacji do natężenia całkowitego promieniowania słonecznego, określenie związku funkcyjnego między ilością (sumą) ciepła wnikającego do gleby podczas dnia a sumą dobową promieniowania słonecznego w okresie wiosenno-letnim, a także określenie i analiza zmienności wartości stosunku procentowego tychże sum pod kątem uchwycenia oddziaływania nań poszczególnych elementów meteorologicznych.

MATERIAŁ I METODY

Materiał obserwacyjny stanowiący podstawę niniejszego opracowania zebrano w trakcie badań stosunków cieplnych gleby prowadzonych na polach doświadczalnych lubelskiej Akademii Rolniczej w Felinie (z glebą lessopodobną) podczas okresów wegetacyjnych w 1978, 1979, 1987, 1989, 1992 i 1993 roku. Dane dotyczące strumienia ciepła w glebie pochodziły z pomiarów na poletkach utrzymywanych w stanie czarnego ugoru (bez roślin), a dane o promieniowaniu słonecznym i innych elementach meteorologicznych – z położonego na skraju tych pól Obserwatorium Agrometeorologicznego AR.

Gęstość strumienia ciepła w glebie (na głębokości 1 cm) określana była zasadniczo kombinowaną metodą obliczeniową, według wzoru:

$$\bar{q}_{z=1} = \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^N Q_i + \bar{q}_{z=20} \quad (3)$$

gdzie: Q_i oznacza zmianę zawartości ciepła w i – tej warstwie gleby pomiędzy poziomem 1 a 20 cm w czasie Δt (obliczaną na podstawie zmian jej temperatury przy znanej objętościowej pojemności cieplnej); N – ilość wydzielonych warstw; $\bar{q}_{z=20}$ – średni strumień ciepła na głębokości $z = 20$ cm w tym samym przedziale czasowym wyznaczany metodą gradientową. Więcej szczegółowych informacji o metodzie i niezbędnych przy jej stosowaniu pomiarach znaleźć można we wcześniejszych pracach (Kossowski 2001a, 2005). Oprócz stosowania tej metody, w la-

w latach 1978 i 1979 prowadzone były także pomiary strumienia ciepła za pomocą płytek-strumieniomy (firmy Middleton), przy czym uzyskane z nich dane były korygowane względem otrzymanych metodą pośrednią (Kossowski 2005). Średnie w kolejnych okresach półgodziny wartości strumienia ciepła o znaku dodatnim (przyjętym dla strumienia skierowanego od powierzchni w głąb gleby) przeliczane były następnie na sumy ciepła wnikającego do gleby w danym dniu (Σq^+).

Natężenie promieniowania słonecznego całkowitego (Q_s) mierzono solarymetrem firmy Kipp i Zonen umieszczonym na wysokości 2,5 m nad powierzchnią trawnika Obserwatorium, przy czym sygnał napięciowy z przyrządu był rejestrowany (z krokiem czasowym nie większym niż 120 sekund), a oprócz tego – zliczany dla kolejnych dni przy użyciu integratora wspomnianej firmy.

Warunki atmosferyczne w danym dniu – poza sumami dobowymi promieniowania słonecznego całkowitego (ΣQ_s) – charakteryzował zestaw następujących danych: usłonecznienie rzeczywiste (u_r w godzinach), zachmurzenie ogólne (N_o w skali 0-10), prędkość wiatru (V_w w $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), niedosyt wilgotności powietrza (n_w w hPa) i średnia temperatura powietrza (T_d w $^{\circ}\text{C}$). Średnie dla danego dnia wartości zachmurzenia, prędkości wiatru i niedosytu wilgotności obliczane były z pomiarów w trzech dziennych terminach obserwacyjnych, a temperatury powietrza – z temperatur ekstremalnych ($T_d = (T_{max} + T_{min})/2$).

W przeprowadzonych analizach posłużono się danymi z wybranych 42 dni w miesiącach maj – lipiec wymienionych wyżej lat, dni wyłącznie bezopadowych, ale reprezentujących różne warunki pogodowe. Ograniczenie materiału do dni bezopadowych pozwoliło na przyjęcie stałej wilgotności gleby w danym dniu (zatem i wartości właściwości cieplnych gleby), jak i na uniknięcie błędów w określaniu strumienia ciepła w glebie z uwagi na szybkie zmiany wilgotności gleby oraz efekty termiczne przy wystąpieniu opadu. Warto też podkreślić, że rozpatrywane w pracy dni z okresu maj – lipiec (w obrębie tzw. insolacyjnego lata) cechuje niewielkie tylko zróżnicowanie proporcji między długością dnia i nocy, a zatem – przy zbliżonym czasie insolacji – również i potencjalna długość okresu występowania strumienia ciepła skierowanego od powierzchni w głąb gleby (i odwrotnie). Zakres (liczebność), a także rodzaj (sposób przygotowania) danych stanowiących podstawę niniejszego opracowania pozostawiono identyczne jak we wcześniejszych publikacjach (Kossowski 2001b, 2003), co umożliwia nawiązanie otrzymanych wyników do już prezentowanych.

WYNIKI

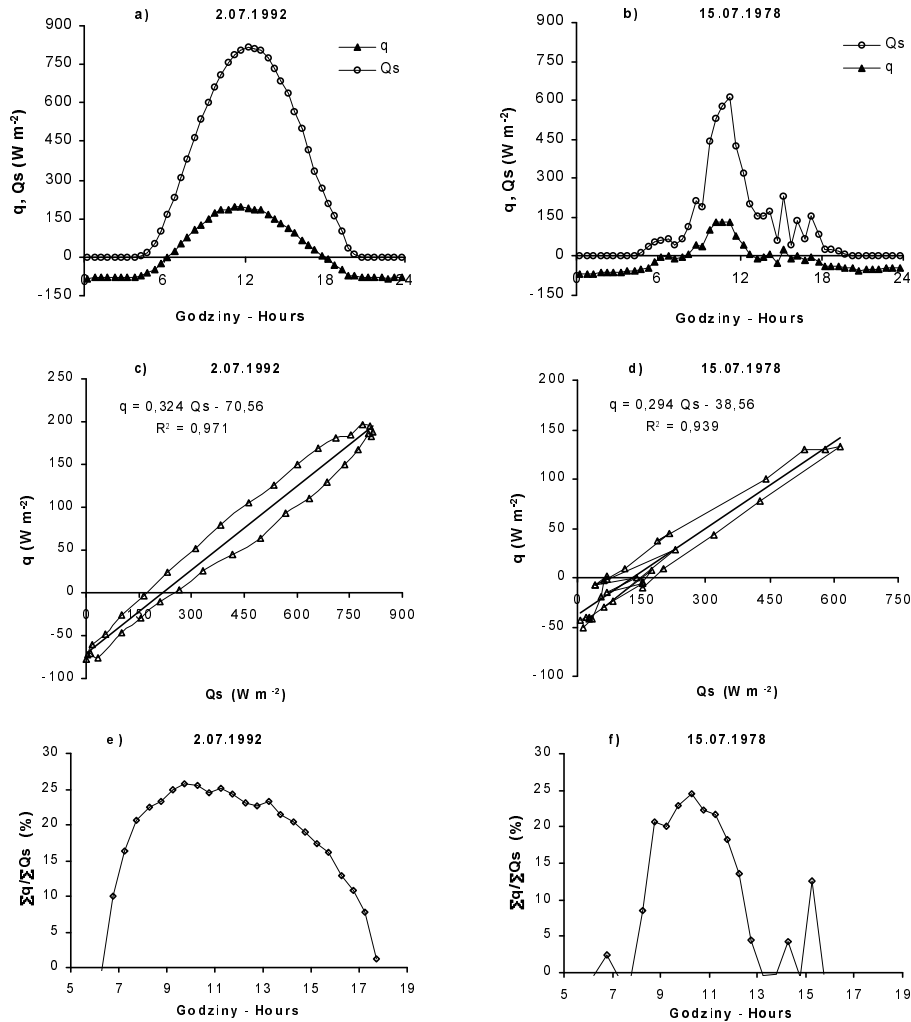
Zagadnienie relacji strumienia ciepła w glebie do natężenia promieniowania słonecznego omówione zostanie – z racji rozważania różnych przedziałów czasowych i korzystania z odmiennych jakościowo danych wyjściowych – w dwóch częściach.

W pierwszej – w oparciu o wartości chwilowe gęstości strumienia ciepła przy powierzchni gleby i natężenia promieniowania słonecznego (ale uśrednione dla przedziałów 0,5-godzinnych) podczas dwóch wybranych przykładowo dni, w drugiej – posługując się sumami strumienia ciepła wnikającego do gleby i sumami promieniowania słonecznego w wybranych dniach 3-miesięcznego okresu wiosenno-letniego.

Przebieg dzienny strumienia ciepła w glebie w relacji do natężenia promieniowania słonecznego

Zasadniczą cechą przebiegu dobowego strumienia ciepła przy powierzchni gleby jest występowanie w nim dwóch okresów (o przeciwnych kierunkach strumienia), których długość jest naturalnie powiązana z dopływem promieniowania słonecznego. Jest to wyraźnie widoczne w przypadku słonecznego, niemal bezchmurnego dnia – jak np. 2.07.1992, który wybrano dla ilustracji omawianego zagadnienia (rys. 1a). Reakcja strumienia ciepła w glebie (q) na pojawienie się czynnika solarnego jest niemal natychmiastowa, lecz początkowo przejawia się zmniejszeniem wartości ujemnych, a stąd moment zmiany kierunku strumienia na dodatni jest wyraźnie opóźniony w stosunku do wschodu słońca (w tym dniu o ok. 2 godziny). Ponowna zmiana kierunku strumienia ciepła (z dodatniego na ujemny) na ogół znacznie wyprzedza moment zachodu słońca (o około 2,5 godz.). W rezultacie, okres występowania strumienia ciepła płynącego od powierzchni w głąb gleby jest krótszy od okresu dziennego liczonego od wschodu do zachodu słońca (w tym przypadku wynosił ok. 12 godzin, przy długości dnia ok. 16,5 godziny).

Charakterystyczne jest też nierównomierne tempo zmian wartości strumienia ciepła wnikającego do gleby w przeciągu dnia: w godzinach rannych obserwuje się szybki wzrost wartości q , maksimum dzienne osiągają one jeszcze przed południem (w dniu 2.07 1992 o godzinę przed nim, w innych bywał notowany jeszcze wcześniej – do 2,5 godziny przed południem), a późniejszy ich spadek następuje w tempie wolniejszym niż poranny wzrost. Toteż typowym zjawiskiem jest różna ilość ciepła wnikającego do gleby (suma q^+) w dopołudniowej i popołudniowej części dnia (w rozpatrywanym dniu sumy te stanowiły odpowiednio 59 i 41% sumy dziennej). Wobec w miarę regularnych zmian w czasie wartości natężenia promieniowania słonecznego (Q_s), czego wyrazem są zbliżone sumy promieniowania w okresie do- i popołudniowym (proporcja 51 do 49% sumy dziennej), notowany jest różny procentowy stosunek wartości q do Q_s w przeciągu kolejnych godzin dnia, jak i sum tych strumieni energii obliczony dla okresu przed i popołudniowego ($\Sigma q^+/\Sigma Q_s$ do południa wynosił 22,3%, po południu 16,5%). Doskonale obrazuje to wykres przedstawiony na rysunku 1e. Od momentu zmiany kierunku strumienia ciepła przy powierzchni gleby wartości stosunku q/Q_s gwałtownie wzrastały,



Rys. 1. Przebieg dobowy gęstości strumienia ciepła w glebie (q) na tle natężenia promieniowania słonecznego (Q_s) w dniu bezchmurnym (a) i o dużym bądź całkowitym zachmurzeniu nieba (b); poniżej (c,d) – gęstość strumienia ciepła w glebie w tychże dniach w funkcji natężenia promieniowania słonecznego (wartości średnie 0,5-godzinne z okresu od wschodu do zachodu słońca) oraz (e,f) stosunek procentowy strumienia ciepła w glebie do promieniowania słonecznego ($\Sigma q^+ / \Sigma Q_s$) w przebiegu dziennym (tylko w przypadku dodatnich wartości strumienia). Felin, wybrane dni lipca

Fig. 1. Daily course of soil heat flux density (q) on a cloudless (a) and cloudy day (b) on the background of total solar radiation (Q_s); below (c,d) – soil heat flux during the same days in a function of solar radiation (mean half-hour values from sunrise to sunset) and (e,f) – percentage ratio of soil heat flux density to solar radiation intensity ($\Sigma q^+ / \Sigma Q_s$) in daily course (for positive values of heat flux only). Felin, chosen days in July

największą wartość (26%) osiągnęły około godz. 10 (2,5 godz. przed południem), w godzinach około i popołudniowych (do godz. 16-tej) notowano ich powolny spadek, dopiero później szybszy. I taki nieregularny przebieg dzienny wartości stosunku q/Q_s (inaczej mówiąc – ilości promieniowania słonecznego wykorzystanej na ogrzewanie gleby) jest typowy dla słonecznego, letniego dnia.

W rezultacie różnego tempa zmian wartości q i Q_s (a jednocześnie relacji q/Q_s) w okresie dziennym występuje charakterystyczny układ (histereza) w przebiegu wartości gęstości strumienia ciepła w glebie przedstawionych w funkcji natężenia promieniowania słonecznego (rys. 1c). Należy też zaznaczyć, że w każdym podobnie jak ten (2.07.1992) pogodnym dniu, odnotowywana jest wysoce istotna zależność chwilowych (czy jak tutaj – uśrednionych dla okresów 0,5-godzinnych) wartości strumienia ciepła w glebie od natężenia promieniowania słonecznego, ze współczynnikami korelacji (r) ponad 0,9 (w rozpatrywanym dniu wynosił on 0,985).

W dniach o zachmurzeniu dużym, zmiennym, z przebłyskami słońca (jak w dniu 15.07.1978), obserwowane są znaczne fluktuacje wartości gęstości strumienia ciepła przy powierzchni gleby, ściśle związane ze zmianami natężenia promieniowania słonecznego (rys. 1b). Poranny moment zmiany kierunku strumienia ciepła w glebie może nastąpić znacznie później, a przedwieczorny – jeszcze wcześniej niż w dniu słonecznym (zależnie od stopnia zachmurzenia i rodzaju chmur w tym czasie). W ciągu dnia (w międzyczasie) mogą też występować – i to niejednokrotnie – dodatkowe zmiany kierunku strumienia z dodatniego na ujemny i odwrotnie (przy okresowym przysłonięciu słońca przez chmury). Przebiegi dobowe gęstości strumienia ciepła przy powierzchni gleby w dniach pochmurnych wykazują mniejszą amplitudę zmian niż w dniu słonecznym, krótszy jest okres występowania dodatnich (skierowanych w głąb gleby) wartości strumienia, a ich sumy dzienne – mniejsze.

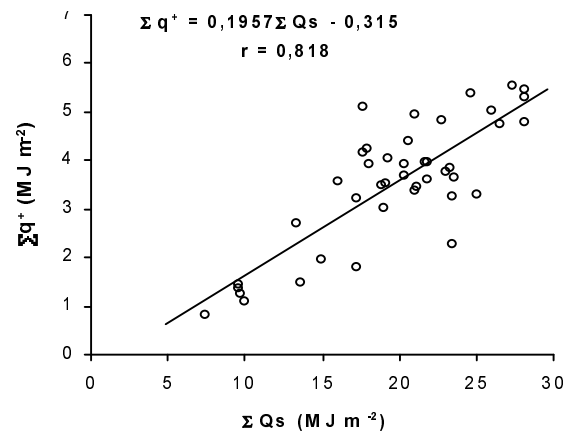
Powyższe (jak i następne) uwagi ilustrują wykresy b, d i f przedstawione na rysunku 1. Można zauważyć, że przebiegi wartości q oraz stosunku q/Q_s w tym dniu w znacznym stopniu odzwierciedlały przebieg natężenia promieniowania słonecznego, a wartość maksymalna q/Q_s osiągnęła niemal ten sam poziom co w dniu bezchmurnym (24,6%). Z racji nieregularnego dopływu promieniowania słonecznego podczas dnia o zachmurzeniu dużym i zmiennym, moment wystąpienia maksimum q (jak i q/Q_s) jest przypadkowy (przebłyaski słońca w danej części dnia to czynnik losowy). Podobnie jest z ilością ciepła wnikającego do gleby w do- i popołudniowej porze dnia. W analizowanym dniu 15.07.1978, suma q^+ w okresie dopołudniowym stanowiła aż 94% sumy dziennej podczas gdy w okresie popołudniowym tylko 6%, natomiast gdy odniesiono te sumy strumienia do sum promieniowania słonecznego (jako procent sumy Q_s wykorzystany na ogrzewanie gleby) okazało się, że wyniosły one odpowiednio 19 i 3%. Wyznaczona dla tego dnia zależność $q = f(Q_s)$ też

była istotna ($r = 0,969$), przy czym – z powodu zmiennego zachmurzenia – zjawisko histerezy zaznaczyło się mniej wyraźnie.

Ilość ciepła wnikającego do gleby podczas dnia w relacji do sumy promieniowania słonecznego

Ilość ciepła wnikającego do gleby w rozpatrywanych 42 bezopadowych dniach (tj. suma strumienia ciepła o wartościach dodatnich, Σq^+) wynosiła od 0,8 do 5,5 MJ·m⁻² (średnia 3,55 MJ·m⁻²), a sumy całkowitego promieniowania słonecznego (ΣQ_s) notowane były w przedziale od 7,4 do 28,1 MJ·m⁻² (średnia 19,73 MJ·m⁻²). Warto podkreślić, że tak duże zróżnicowanie (w tym rozstęp między wartościami skrajnymi) obu tych sum zanotowano mimo stosunkowo niewielkiej liczebności dni (i ograniczenia się do dni bezopadowych). Jednocześnie, o wystarczająco dobrej reprezentatywności uwzględnianych tu dni świadczyć może udział procentowy (częstość) dni o określonym przedziale wartości ΣQ_s (19,0%, 26,2% i 54,8% – odpowiednio dla przedziału 5-15, 15-20 i >20 MJ·m⁻²), niewiele odbiegający od stwierdzonego przy analizie wielokrotnie szerszego materiału obserwacyjnego dotyczącego dni bez opadu w okresie letnim (Kossowski i Łykowski 2007).

Zależność między ilością ciepła wnikającego do gleby podczas dnia (Σq^+) a sumą dzienną promieniowania słonecznego (ΣQ_s) wyznaczoną na podstawie danych z rozpatrywanych dni opisuje równanie regresji liniowej (rys. 2), ze współczynnikiem korelacji $r = 0,818$. Mimo iż otrzymane równanie (model) zależności jest wysoce istotne statystycznie (o poziomie $p < 0,001$), to rozrzut punktów wokół linii regresji (rozproszenie danych) okazał się nadspodziewanie duży. Wiąże się on zapewne z oddziaływaniem innych (poza solarnym) czynników pogodowych na strumień ciepła wnikający do gleby, w tym elementów meteorologicznych określających warunki dopływu promieniowania słonecznego, tj. stopniem pokrycia nieba przez chmury i czasem operacji słońca (usłonecznienie rzeczywiste) oraz wpływających tylko na wielkość wymiany ciepła przez powierzchnię gleby, tj. prędkością wiatru czy wilgotnością powietrza (Kossowski 2001b). Idąc tym tokiem rozumowania, przebadano związek między Σq^+ a sumą promieniowania słonecznego w połączeniu z poszczególnymi elementami meteorologicznymi oraz całym ich zestawem, mając na względzie znaczenie dodatkowego ich wpływu na wielkość sum q^+ . Uzyskane wyniki (w postaci równań regresji wielokrotnej) przedstawiono w tabeli 1. Stwierdzono, że każdy z 5-ciu branych pod uwagę (pojedynczo) elementów meteorologicznych powiększa – w mniejszym lub większym stopniu – siłę związku Σq^+ z ΣQ_s , o czym świadczą większe wartości współczynnika determinacji (R^2) poszczególnych równań w porównaniu do otrzymanego dla zależności Σq^+ od ΣQ_s , ale statystycznie istotną dodatkową zmienną okazała się tylko prędkość wiatru.



Rys. 2. Zależność ilości ciepła wnikaącego do gleby podczas dnia (Σq^+) od sum dobowych całkowitego promieniowania słonecznego (ΣQ_s). Felin, wybrane 42 dni bezopadowe w okresie maj – lipiec

Fig. 2. Relationship between sums of heat flux into soil during a day (Σq^+) and sums of global solar radiation (ΣQ_s). Felin, chosen 42 days without precipitation in May – July period

Tabela 1. Równania zależności między sumą ciepła wnikaącego do gleby podczas dnia (Σq^+) a sumą dobową całkowitego promieniowania słonecznego (ΣQ_s) w połączeniu z wybranymi elementami meteorologicznymi potraktowanymi oddzielnie i łącznie (u_r – usłonecznienie rzeczywiste, N_o – zachmurzenie ogólne, V_w – prędkość wiatru, n_w – niedosyt wilgotności powietrza, T_d – średnia temperatura powietrza), a także wartości współczynników determinacji (R^2) i standardowego błędu estymacji (SEE) dla tych równań

Table 1. Regression equations between sums of heat flux into soil during a day (Σq^+) and daily sums of global solar radiation (ΣQ_s) in connection with selected meteorological elements treated separately and together (u_r – real sunshine duration, N_o – total cloudiness, V_w – wind speed, n_w – air saturation deficit, T_d – mean air temperature), and also values of determination coefficient (R^2) and standard error of estimation (SEE) at these equations

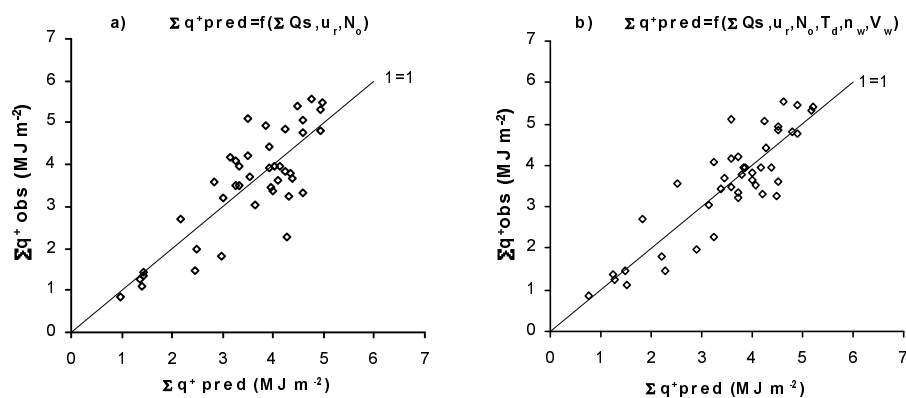
| Równania regresji – Regression equations | R^2 | SEE ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) |
|--|-------|---------------------------------------|
| $\Sigma q^+ = 0,196 \Sigma Q_s^{***} - 0,315$ | 0,669 | 0,754 |
| $\Sigma q^+ = 0,131 \Sigma Q_s^* + 0,093 u_r + 0,012$ | 0,686 | 0,744 |
| $\Sigma q^+ = 0,168 \Sigma Q_s^{***} - 0,063 N_o + 0,479$ | 0,676 | 0,755 |
| $\Sigma q^+ = 0,199 \Sigma Q_s^{***} - 0,014 T_d - 0,171$ | 0,671 | 0,762 |
| $\Sigma q^+ = 0,175 \Sigma Q_s^{***} + 0,05 n_w - 0,325$ | 0,680 | 0,751 |
| $\Sigma q^+ = 0,186 \Sigma Q_s^{***} - 0,211 V_w^{**} + 0,502$ | 0,734 | 0,685 |
| $\Sigma q^+ = 0,13 \Sigma Q_s^* + 0,103 u_r + 0,013 N_o - 0,125$ | 0,686 | 0,753 |
| $\Sigma q^+ = 0,14 \Sigma Q_s^{**} + 0,046 u_r + 0,063 N_o - 0,115 T_d^{*+}$ $+ 0,173 n_w^* - 0,211 V_w^{**} + 0,995$ | 0,786 | 0,648 |

Objaśnienia: dodatkowe oznaczenia przy zmiennych informują o poziomie ich istotności:

*** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$ – Explanations: signs ***, ** and * inform that significance level (p) at given variable is smaller than 0.001, 0.01 and 0.05, respectively.

Równanie opisujące zależność ilości ciepła wnikającego do gleby podczas dnia (Σq^+) od całokształtu czynników atmosferycznych (tj, sumy promieniowania słonecznego łącznie z wszystkimi uwzględnianymi tu podstawowymi elementami meteorologicznymi) wykazuje jako zmienne statystycznie istotne – obok ΣQ_s i prędkości wiatru – także niedosyt wilgotności i temperaturę powietrza (tab. 1). Współczynnika determinacji ($R^2 = 0,786$) nie można jednak uznać za nadzwyczaj wysoki, a błąd standardowy szacowania wartości Σq^+ za pomocą tego równania ($0,65 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) okazał się większy niż przy stosowaniu innych równań (Kossowski 2003). Możliwość i dokładność szacowania sum ciepła wnikającego do gleby przy użyciu omawianego równania – w porównaniu do równania uwzględniającego tylko trzy zmienne dotyczące lub związane z promieniowaniem słonecznym (ΣQ_s , u_r i N_o) – ilustrują wykresy na rysunku 3.

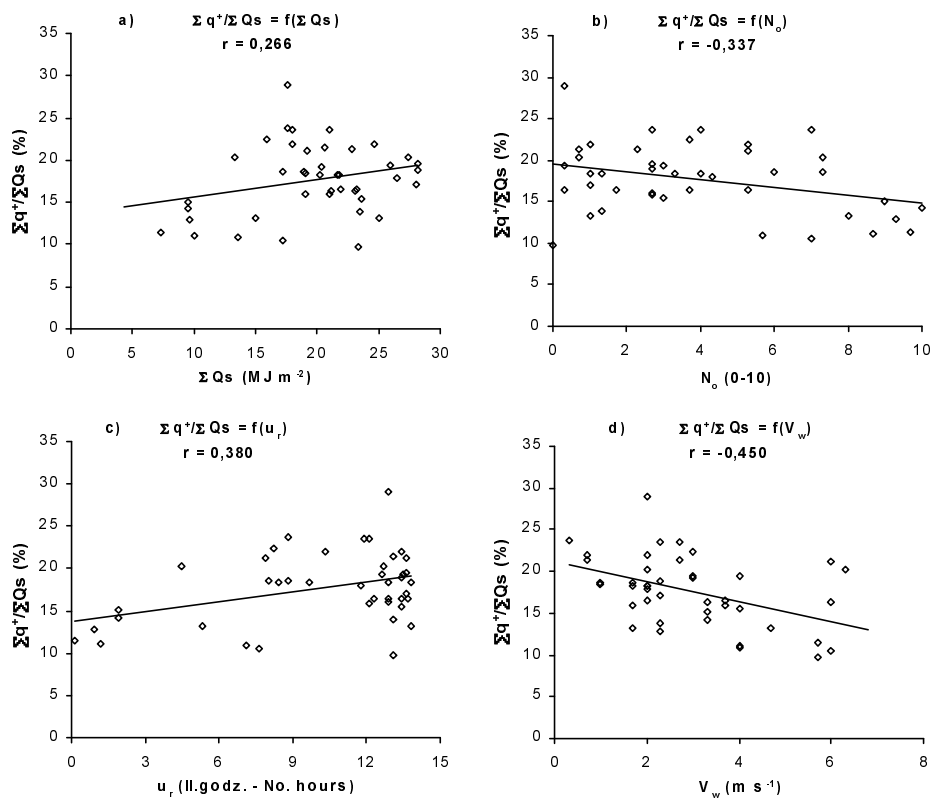
Obliczone w oparciu o rozpatrywany materiał obserwacyjny wartości stosunku procentowego sumy ciepła wnikającego do gleby i sumy całkowitego promieniowania słonecznego w poszczególnych dniach ($\Sigma q^+/\Sigma Q_s$) kształtowały się między 9,7 a 29%, a średnia wynosiła 17,7%. Najczęściej – niemal w połowie (20 na 42) przypadków – notowano je w przedziale 15-20%. Warto też dodać, że najwyższe wartości stosunku $\Sigma q^+/\Sigma Q_s$ (ponad 23%) obserwowano nie przy najwyższych – jak można by oczekiwać – ale przy średnich wartościach sum dziennych promieniowania słonecznego, natomiast najniższe wartości tego stosunku (mniejsze niż 12%) były notowane w bardzo szerokim przedziale wartości ΣQ_s (od 7,4 do 23,4 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$).



Rys. 3. Porównanie dziennych sum strumienia ciepła wnikającego do gleby uzyskanych drogą pomiarów (Σq^+ obs) z obliczonymi (Σq^+ pred) według równań wyznaczonych w oparciu o dane ΣQ_s łącznie z u_r i N_o (wykres a) oraz o dane ΣQ_s łącznie z 5 elementami meteorologicznymi (wykres b). Uwaga: oba te równania zamieszczono w tabeli 1.

Fig. 3. Comparison of measured daily sums of heat flux into soil (Σq^+ obs) and those calculated (Σq^+ pred) using the equation obtained on the basis of ΣQ_s in connection with u_r and N_o data (graph a) and values of ΣQ_s together with u_r , N_o , T_d , n_w and V_w data (graph b). Note: both equations are shown in Table 1

W wyniku przeprowadzenia stosownych badań (*vide* rys. 4) stwierdzono, że wartości stosunku $\Sigma q^+/\Sigma Q_s$ nie wykazywały wyraźnego związku z sumami dziennymi promieniowania słonecznego (współczynnik korelacji wyniósł tylko 0,266), natomiast analiza powiązania wartości tego stosunku z poszczególnymi elementami meteorologicznymi wykazała istotną statystycznie zależność w przypadku usłonecznienia rzeczywistego, stopnia zachmurzenia i prędkości wiatru. Równanie



Rys. 4. Związek między wielkością stosunku procentowego $\Sigma q^+/\Sigma Q_s$ a sumami dziennymi promieniowania słonecznego (ΣQ_s) oraz wybranymi elementami meteorologicznymi (N_o – stopień zachmurzenia; u_r – usłonecznienie rzeczywiste; V_w – prędkość wiatru). Felin, wybrane 42 dni bezopadowe w okresie maj – lipiec

Fig. 4. Relationship between values of percentage ratio of $\Sigma q^+/\Sigma Q_s$ and daily sums of solar radiation (ΣQ_s) and selected meteorological elements (N_o – cloudiness; u_r – sunshine duration; V_w – wind speed). Felin, chosen 42 days without precipitation in May – July period

opisujące zależność wartości stosunku $\Sigma q^+/\Sigma Q_s$ od wszystkich danych meteorologicznych łącznie otrzymano w postaci:

$$\Sigma q^+/\Sigma Q_s = 20,33 - 0,26\Sigma Q_s + 0,55u_r + 0,36N_o - 0,54T_d + 0,82n_w^* - 1,05V_w^{**} \quad (4)$$

przy czym R^2 wynosił tylko 0,404, a błąd standardowy szacowania 3,5%.

DYSKUSJA WYNIKÓW

Otrzymane wyniki dotyczące relacji między ilością ciepła wnikającego do gleby podczas dnia (Σq^+) a sumą całkowitego promieniowania słonecznego (ΣQ_s) – z racji przyjętej metodyki, a także liczebności i specyfiki materiału obserwacyjnego – nie są w pełni adekwatne do danych literaturowych. Wielkości sum dodatnich wartości strumienia ciepła przy powierzchni gleby w okresie dziennym jakie napotkano w kilku pracach (Oliver i in. 1987, Enz i in. 1988, Skoczek 1994) trudno uznać za w pełni wiarygodne. Uzyskano je bowiem z bezpośrednich pomiarów strumieniomierzami ciepła bez przeprowadzenia koniecznej weryfikacji i korekty ze względu na błędy pomiaru (Philip 1961, Kossowski 2005). W rezultacie tego – jak można sądzić – otrzymywano z reguły zaniżone wartości stosunku $\Sigma q^+/\Sigma Q_s$. Tak też wypada odnosić się np. do wartości $\Sigma q^+/\Sigma Q_s$ podanych przez Enza i innych (1988) z pomiarów przeprowadzonych na glebie bez roślin wynoszących w poszczególnych dniach od 4,8 do 12,6%, czy rezultatów zawartych w pracy Oliver i in. (1987), z wartościami tego stosunku między 9,7 a 12,7%. W dodatku, ponieważ dotyczą one tylko kilku wybranych dni, trudno uznać je za właściwie oddające możliwe zróżnicowanie wartości stosunku $\Sigma q^+/\Sigma Q_s$ (choćby w porównaniu do stwierdzonego w prezentowanych tu badaniach na poletkach bez roślin w Felinie).

Odnosnie zróżnicowania (rozrzutu) wartości Σq^+ , a zwłaszcza stosunku $\Sigma q^+/\Sigma Q_s$ stwierdzonego przy określaniu ich zależności od sumy dziennej promieniowania słonecznego i innych danych meteorologicznych, warto dodać jeszcze następującą uwagę. W przeprowadzonych analizach nie były uwzględniane wartości albedo (nie we wszystkich dniach je mierzono), a które – z uwagi na zależność od stanu powierzchni gleby (w tym jej uwilgotnienia) – na pewno w jakimś stopniu wpływały na zróżnicowanie ilości ciepła faktycznie pochłanianego przez glebę. Nie umniejsza to jednak celowości dokonanych analiz i wiarygodności uzyskanych wyników.

Ilość ciepła wnikającego podczas dnia do gleby odniesiona do sumy całkowitego promieniowania słonecznego ($\Sigma q^+/\Sigma Q_s$) jest z oczywistych względów (patrz równanie 2) znacznie mniejsza niż gdy odniesie się ją do wartości bilansu radiacyjnego (Rn). Jako przykład mogą służyć dane z dnia 6 i 12 czerwca 1979, w których stosunek sumy wartości q^+ do sumy dodatnich wartości Rn (tj. $\Sigma q^+/\Sigma Rn^+$) wynosił – odpowiednio – 34,5 i 35,7% (Kossowski 2001a), podczas

gdy wartości $\Sigma q^+/\Sigma Q_s$ tylko 16,5 i 18,4%. Zestawienie tych danych dobitnie ilustruje proporcję między ilością ciepła zużywaną na ogrzewanie gleby a ilością promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni gleby oraz ilością energii dostępnej i rozchodowanej w tym i innych procesach w ciągu dnia.

WNIOSKI

Podsumowaniem przedstawionych w pracy wyników są następujące, najważniejsze stwierdzenia i wnioski.

1. Materiał obserwacyjny stanowiący podstawę opracowania (mimo ograniczonej do 42 dni liczebności danych) wystarczająco dobrze – jak się wydaje – charakteryzował warunki insolacyjne i przepływu ciepła w glebie nie porośniętej roślinnością występujące w dniach bezopadowych okresu wiosenno-letniego w miejscu pomiarów (Felin koło Lublina).

2. Gęstość strumienia ciepła notowanego tuż pod powierzchnią gleby w ciągu dnia jest ściśle związana z przebiegiem natężenia całkowitego promieniowania słonecznego. Przejawem tego – między innymi – jest niemal natychmiastowa reakcja strumienia na zmiany w dopływie promieniowania przy okresowym przesłonięciu tarczy słonecznej przez chmury, a także wysokie współczynniki korelacji otrzymane przy badaniu zależności między chwilowymi (lub uśrednionymi dla krótkich przedziałów czasowych) wartościami strumienia a promieniowania słonecznego w okresie dziennym.

3. Okres występowania wartości dodatnich strumienia (o kierunku od powierzchni w głąb gleby) jest o kilka godzin krótszy od czasu między wschodem a zachodem słońca. Inne charakterystyczne cechy przebiegu dziennego strumienia ciepła w glebie w porównaniu do przebiegu promieniowania słonecznego powodują, iż stosunek wartości tego strumienia do wartości promieniowania w przeciągu dnia jest na ogół niesymetryczny względem momentu górowania słońca (większy w okresie do- niż popołudniowym), a największe wartości stosunku (rzędu 25-30%) występują około 2-3 godzinny przed południem.

4. Ilość ciepła wnikającego podczas całego dnia do gleby (suma wartości dodatnich strumienia ciepła) stanowi przeważnie mniej niż 20% sumy dobowej całkowitego promieniowania słonecznego, przy czym wykazuje wyraźną zależność od wielkości tych sum promieniowania.

5. Równania opisującego zależność między ilością ciepła wnikającego w ciągu dnia do gleby (Σq^+) a sumą dzienną promieniowania słonecznego (współczynnik determinacji 0,67) nie rekomenduje się jednak używać do szacowania wartości Σq^+ , gdyż lepszą dokładność (mniejszy błąd) szacowania można uzyskać stosując równania uwzględniające również inne dane meteorologiczne.

PIŚMIENNICTWO

- Allmaras R.R., Hallauer E.A., Nelson W.W., Evans S.D., 1977. Surface energy balance and soil thermal property modifications by tillage-induced soil structure. *Minnesota Agric. Exp. Sta. Tech. Bul.*, 306, 1-40.
- Clothier B.E., Clawson K.L., Pinter P.J., Moran M.S., Reginato R.J., Jackson R.D., 1986. Estimation of soil heat flux from net radiation during the growth of alfalfa. *Agric. For. Meteorol.*, 37, 319-329.
- Enz J.W., Brun L.J., Larsen J.K., 1988. Evaporation and energy balance for bare and stubble covered soil. *Agric. For. Meteorol.*, 43, 59-70.
- Eulenstein F., Urbaniak M., Chojnicki B.H., Olejnik J., 2005. Influence of plant cover on the share of the soil heat flux in the heat balance of the active surface. *Int. Agrophysics*, 19, 31-36.
- Fuchs M., Hadas A., 1972. The soil heat flux density in a non-homogeneous bare loessial soil. *Boundary Layer Meteorol.*, 3, 191-200.
- Grzybowski J., Itier B., 1984. Związki między składnikami bilansu cieplnego nad różnymi rodzajami upraw. *Przegl. Geofiz.*, 29, 1, 27-39.
- Ham J.M., Heilman J.L., Lascano R.J., 1991. Soil and canopy energy balances of a row crop at partial cover. *Agron. J.*, 83, 744-753.
- Idso S.B., Aase J.K., Jackson R.D., 1975. Net radiation – soil heat flux relation as influenced by soil water content variations. *Bound. Layer Meteorol.*, 9, 113-122.
- Kapuściński J., Moczko J., 1990. Udział strumienia ciepła w glebie w strukturze bilansu cieplnego powierzchni czynnej. *Zesz. Nauk. AR w Krakowie*, 246, 117-129.
- Karpińska Z., 1985. Wpływ opadu naturalnego i nawodnień deszczownianych na termikę gleby w zróżnicowanych warunkach pogodowych. *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu*, 155, *Melioracja* 28, 177-193.
- Kędziora A., Kapuściński J., Moczko J., Olejnik J., Karliński M., 1989. Struktura bilansu cieplnego pola lucerny. *Roczn. AR w Poznaniu* 110, *Meliorecje* 201, 8, 31-39.
- Kossowski J., 1996. Response of soil heat flux to soil compaction. In: *Meteorological processes in the boundary layer of the atmosphere* (Ed. T. Hurlalova). *Proc. Int. Conf.*, Stara Lesna, Slovakia, 7-11, October 1996, 127-131.
- Kossowski J., 1999. Strumień i akumulacja ciepła w glebie podczas dni o różnych warunkach atmosferycznych. W: *Modelowanie i monitorowanie procesów agrofizycznych w środowisku glebowym* (Red. R. Walczak, B. Usowicz). PTA, Lublin 1999, 44-47.
- Kossowski J., 2000. Bilans promieniowania na polu pszenicy, koniczyny i bez roślin w relacji do całkowitego promieniowania słonecznego. *Acta Agrophysica*, 34, 89-100.
- Kossowski J., 2001a. O relacji między strumieniem ciepła w glebie a bilansem promieniowania na polu bez roślin i z pokrywą roślinną. *Acta Agrophysica*, 45, 117-129.
- Kossowski J., 2001b. O związku strumienia ciepła w glebie z elementami meteorologicznymi. *Przegl. Nauk. Wydz. Inż. Kszt. Środ. SGGW*, 21, 117-121.
- Kossowski J., 2003. Wpływ warunków meteorologicznych na strumień ciepła w glebie. *Przegl. Nauk. Inż. Kszt. Środ.*, 12, 1(26), 114-119.
- Kossowski J., 2005. Problemy metodyczne pomiaru strumienia ciepła w glebie: weryfikacja danych względem uzyskanych inną metodą. *Przegl. Nauk. Inż. Kszt. Środ.*, 14, 2(32), 60-71.
- Kossowski J., Łykowski B., 2007. Sumy dzienne promieniowania słonecznego w okresie letnim w Felinie k/Lublina i ich związek z usłonecznieniem i zachmurzeniem. *Przegl. Nauk. Inż. Kszt. Środ.*, 16, 1(35), 74-84.

- Kossowski J., Sikora E., 1976. The effect of growth vegetation cover on the heat accumulation in the soil in a rye field. *Pol. Ecol. Stud.* 2, 1, 23-33.
- Kossowski J., Sikora E., 1977. Comparison of heat accumulation in the soil in a rye field, potato field and in a field without plant cover. *Ekol. Pol.*, 25, 1, 163-173.
- Kustas W.P., Daughtry C.S.T., 1990. Estimation of the soil heat flux/net radiation ratio from spectral data. *Agric. For. Meteorol.*, 49, 205-223.
- Oliver S.A., Oliver H.R., Wallace J.S., Roberts A.M., 1987. Soil heat flux and temperature variation with vegetation, soil type and climate. *Agric. For. Meteorol.*, 39, 257-269.
- Philip J.R., 1961. The theory of heat flux meters. *J. Geophys. Res.*, 66, 571-579.
- Skoczek J., 1970. Wpływ podłoża atmosfery na przebieg dobowy bilansu cieplnego powierzchni czynnej. IG PAN, *Prace Geogr.* 84, 1-96.
- Skoczek J., 1994. Struktura bilansu cieplnego powierzchni czarnoziemiu (na przykładzie badań ekspedycyjnych w Mołdawii). *Zesz. IGPZ PAN*, 26, 21-39, 1994.

THE RELATION BETWEEN SOIL HEAT FLUX AND SOLAR RADIATION

Jan Kossowski

Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin
e-mail: jkoss@demeter.ipan.lublin.pl

Abstract. The paper presents an analysis of daily courses of heat flux density in bare soil in relation to global solar radiation intensity, as well as the relationship between sums of positive soil heat flux values (directed into soil) and daily sums of solar radiation (separately and together with standard meteorological elements). The observational materials were collected during 42 days without precipitation in May-July periods on the experimental fields at Felin near Lublin. It was found that the ratio of soil heat flux into soil to solar radiation values changed during a day in a distinctive way and was higher in the morning (with maximum about 0.25-0.3) than in the afternoon. However, the ratio of sum of positive soil heat flux to sum of solar radiation on examined days ranged from 0.09 to 0.29 (on average 0.18). Obtained linear regression equation describing the sums of heat flux into soil as a function of solar radiation sums (with determination coefficient 0.67) appeared to be insufficiently useful for the estimation of the soil heat flux sum.

Key words: soil heat flux, global solar radiation, days without precipitation