

O MOŻLIWOŚCIACH I DOKŁADNOŚCI SZACOWANIA STRUMIENIA CIEPŁA WNIKAJĄCEGO DO GLEBY PODCZAS DNIA NA PODSTAWIE DANYCH METEOROLOGICZNYCH

Jan Kossowski

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

Streszczenie. Praca dotyczy wpływu warunków pogodowych na wielkość wymiany ciepła przez powierzchnię gleby, a w szczególności - na ilość ciepła wnikającego do gleby w ciągu dnia. Materiał obserwacyjny stanowiły dane uzyskane w pomiarach przeprowadzonych na polach doświadczalnych bez szaty roślinnej w Felinie podczas 42 dni bezopadowych w kilku okresach wiosenno-letnich. Określano i analizowano zależności pomiędzy wielkością sum dziennych strumienia ciepła wnikającego do gleby a danymi meteorologicznymi traktowanymi pojedynczo i kompleksowo (jako rozmaite kombinacje zawierające 2-12 danych w wariancie bez i z uwzględnieniem sum dziennych promieniowania słonecznego). Ustalono jakie elementy meteorologiczne wpływają najbardziej lub wykazują istotny związek z wielkością tych sum, a przy tym udokumentowano znaczący na nie wpływ zmian warunków pogodowych z dnia na dzień. Porównanie wartości współczynników determinacji otrzymanych dla równań regresji wielokrotnej o różnej liczbie zmiennych (danych meteorologicznych) oraz wielkości błędów szacowania sum strumienia ciepła wnikającego do gleby podczas dnia za pomocą każdego z tych równań, pozwoliło na ustalenie najlepszych (optymalnych) modeli, tj. dających najmniejsze błędy przy minimalnej liczbie danych wyjściowych. Równanie rekomendowane jako najbardziej korzystne do stosowania zawiera 7 zmiennych (sumy dzienne promieniowania słonecznego, średnią dla dnia prędkość wiatru, amplitudę dobową temperatury powietrza, średnią i maksymalną temperaturę powietrza oraz różnicę średniej i maksymalnej temperatury powietrza między danym a poprzednim dniem), ale do ich uzyskania konieczne są pomiary tylko 3 danych (promieniowania, wiatru i temperatury powietrza). Dokładność szacowania sum dziennych strumienia ciepła wnikającego do gleby przy użyciu tego równania określają: standardowy błąd estymacji około $0,47 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, błąd względny średni 11%, a maksymalny - powyżej 30%.

Słowa kluczowe: strumień ciepła w glebie, estymacja, elementy meteorologiczne

WSTĘP

Niedostateczna ilość danych pomiarowych strumienia ciepła w glebie z jednej strony, a z drugiej – konieczność ich uwzględniania w modelowych badaniach struktury bilansu cieplnego powierzchni czynnej prowadzonych w różnej skali

przestrzennej i czasowej, to główne powody poszukiwań ilościowych związków pomiędzy wielkością wymiany ciepła przez powierzchnię gleby a powszechnie dostępnymi danymi meteorologicznymi. Podstawą takich działań są odpowiednio przeprowadzone pomiary strumienia ciepła w glebie (choćby tylko punktowe), równoczesne z obserwacjami meteorologicznymi. Różne jednak sposoby podejścia stosowano przy opracowywaniu i analizie zebranych danych, tak strumienia ciepła (uwypuklając bądź nie naturę wymiany ciepła przez powierzchnię gleby w cyklu dobowym), jak i danych meteorologicznych (między innymi dokonując ich wyboru pod kątem istotności powiązania ze strumieniem ciepła w glebie).

Do opisu wymiany ciepła z glebą (jako miarę) stosowane były zarówno wartości średnie strumienia ciepła (z uwzględnieniem znaku, w $W \cdot m^{-2}$), jak i sumy strumienia obliczane dla określonej pory (dzień, noc) lub całej doby (w $J \cdot m^{-2}$). Ten pierwszy sposób, zresztą spotykany w literaturze częściej, stosowali między innymi agrometeorolodzy z ośrodka poznańskiego, wyznaczając związek między średnimi dekadowymi wartościami strumienia ciepła w glebie a zmianami temperatury powietrza w tym czasie (Kapuściński 2000) oraz zależności tego strumienia od wartości kilku wybranych elementów meteorologicznych (łącznie). Były to: usłonecznienie, temperatura i niedosyt wilgotności powietrza (Kapuściński i Moczko 1990) lub usłonecznienie, temperatura powietrza i prędkość wiatru (Leśny i in. 2001), a także i inne niestandardowe dane (Dąbrowska-Zielińska 1995, Tuchołka i Moczko 2001). Drugi sposób podejścia, tj. wyznaczanie (oddzielnie) ilości ciepła, która w ciągu danego cyklu dobowego przepływa od powierzchni w głąb gleby i odwrotnie, pozwala na bardziej realne określenie wielkości wymiany ciepła z glebą podczas doby. Także bardziej adekwatne do rzeczywistości jest wówczas poszukiwanie związku między ilością ciepła wnikającego do gleby w ciągu dnia a warunkami pogodowymi charakteryzowanymi poprzez dane meteorologiczne odnoszące się właściwie tylko do okresu dziennego (jak sumy promieniowania słonecznego, usłonecznienie, ale i średnie wartości elementów obliczane z trzykrotnych obserwacji w ciągu dnia). Taki też tryb postępowania (i sposób przygotowania danych wyjściowych) zastosowano w dotychczasowych (aczkolwiek fragmentarycznych) opracowaniach poświęconych zagadnieniu meteorologicznych uwarunkowań strumienia ciepła w glebie (Kossowski 1999, 2001, 2003, 2007), jak również w niniejszej pracy.

Zasadniczym problemem przy próbach szacowania strumienia ciepła w glebie w oparciu o dane meteorologiczne pozostaje jednak odpowiedni dobór zestawu tych danych, możliwie jak najlepiej charakteryzującego warunki pogodowe w danym dniu, a oprócz tego – co w trakcie badań okazało się nader istotne – zmianę warunków pogodowych w porównaniu z dniem poprzednim. Ważnym czynnikiem przy doborze danych może być ich dostępność (tak w bieżących pomiarach jak i w zasobach archiwalnych), ale podstawę merytoryczną powinna stanowić analiza racjonal-

ności stosowania poszczególnych danych, tj. istotności (wagi) danego elementu jako zmiennej w równaniach opisujących związek strumienia ciepła w glebie z warunkami atmosferycznymi. Konieczna jest też weryfikacja (ustalenie zgodności) danych obliczonych według równań z otrzymanymi w pomiarach, gdyż pozwala to na właściwe rozeznanie dokładności szacowania strumienia ciepła w glebie, jak i uzasadnienie decyzji o wyborze równania (modelu) – zawierającego określoną liczbę i rodzaj zmiennych – do wykorzystania w dalszych badaniach.

Celem niniejszej pracy jest określenie związku między ilością ciepła wnikającego do gleby podczas dnia a danymi meteorologicznymi (w tym sumą dzienną promieniowania słonecznego) rozpatrywanymi w różnych kombinacjach i przy różnej ich liczbie, tj. mniej lub bardziej kompleksowo. Przebadanie tych zależności, na przykładzie danych z pola uprawnego bez roślin w okresie wiosenno-letnim, traktowano jako końcowy etap (podsumowanie) dotychczasowych prac, mając zwłaszcza na uwadze aspekt optymalizacji (możliwie dokładnego przy jak najmniejszej liczbie parametrów) szacowania strumienia ciepła w glebie na podstawie danych meteorologicznych.

MATERIAŁ I METODY

Materiał obserwacyjny zebrano podczas badań prowadzonych w kilku sezonach wegetacyjnych na obiektach (Obserwatorium Agrometeorologiczne i poletka doświadczalne) lubelskiej Akademii Rolniczej w Felinie k/Lublina. W pracy wykorzystane zostały wyniki pomiarów strumienia ciepła w glebie na poletkach utrzymywanych w stanie „czarnego ugoru” (z glebą płową, lessopodobną) w wybranych 42 dniach bezopadowych w miesiącach maj – lipiec. Liczebność i sposób przygotowania tych danych - identyczne jak we wcześniejszych publikacjach - umożliwia nawiązanie przedstawianych tu wyników do już prezentowanych.

Gęstość strumienia ciepła w glebie na głębokości 1 cm w kolejnych (0,5 lub 1-godzinnych) przedziałach czasowych w ciągu doby określana była kombinowaną metoda obliczeniową, a także mierzona za pomocą płytek-strumieniomyczy ciepła firmy Middleton. Szczegółowe informacje o metodzie obliczeniowej, niezbędnych przy jej stosowaniu pomiarach oraz sposobie korygowania danych ze strumieniomyczy podano w innej pracy (Kossowski 2005). Średnie dla okresów półgodzinnych 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^+).

Przy opisywaniu warunków atmosferycznych stosowane były następujące dane: sumy dobowe promieniowania słonecznego całkowitego (ΣQ_s), usłonecznienie rzeczywiste (u_r), zachmurzenie ogólne (N_o), prędkość wiatru (V_w), niedosyt wilgotności powietrza (n_w), średnia temperatura powietrza (T_d), temperatura mi-

nimalna (T_{min}) i maksymalna (T_{max}) oraz amplituda dobowa temperatury powietrza (aT), a także – jako wskaźniki zmian (bądź utrzymywania się) ogólnych warunków pogodowych – różnica wielkości usłonecznienia między dniem rozpatrywanym (ur_n) a poprzednim ($\Delta u_r = ur_n - ur_{n-1}$), różnica średniej temperatury powietrza między dniem rozpatrywanym (Td_n) a poprzednim ($\Delta T_d = Td_n - Td_{n-1}$), różnica maksymalnej temperatury powietrza między dniem rozpatrywanym ($Tmax_n$) a poprzednim ($\Delta T_{max} = Tmax_n - Tmax_{n-1}$) oraz różnica minimalnej temperatury powietrza między dniem rozpatrywanym ($Tmin_n$) a następującym po nim ($\Delta T_{min} = Tmin_n - Tmin_{n+1}$). Średnie dla danego dnia wartości zachmurzenia, prędkości wiatru i niedosytu wilgotności powietrza obliczane były z pomiarów w trzech dziennych terminach obserwacyjnych, a średnia temperatura powietrza – z temperatur ekstremalnych: $T_d = (T_{min} + T_{max})/2$. Sposób ten wybrano celowo, mając na uwadze zmniejszenie ilości pochodzących z pomiarów danych wyjściowych.

Odnosnie materiału obserwacyjnego warto dodać, że – pomimo stosunkowo niewielkiej liczebności – wszystkie rozpatrywane dane cechowała dość znaczna rozpiętość wartości. Sumy ciepła wnikającego do gleby w danym dniu notowane były w przedziale od 0,8 do 5,6 MJ·m⁻², sumy promieniowania słonecznego od 7,5 do 28,1 MJ·m⁻², usłonecznienie w zakresie 0–13,8 godziny, zachmurzenie w całej skali (0–10), średnia prędkość wiatru wynosiła od 0,3 do 6,3 m·s⁻¹, niedosyt wilgotności powietrza 3,0–14,9 hPa, średnia temperatura powietrza 8,3–23,0°C, amplituda dobowa temperatury powietrza 5,1–17,8°C, temperatura minimalna 2,6–17,3°C, temperatura maksymalna 13,0–28,6°C, różnice średniej temperatury powietrza (ΔT_d) występowały w przedziale od –3,5°C (przy spadku temperatury w porównaniu z dniem poprzednim) do 3,3°C (gdy temperatura była wyższa niż w dniu poprzednim), różnice temperatury minimalnej (ΔT_{min}) od –6,2 do 5,9°C, temperatury maksymalnej (ΔT_{max}) od –4,8 do 4,8°C, a zmiany usłonecznienia (Δu_r) wynosiły od –11,0 do 11,6 godzin.

W przeprowadzonych analizach związku między ilością ciepła wnikającego do gleby podczas dnia a danymi meteorologicznymi stosowano metodę regresji liniowej (jednej i wielu zmiennych), w tym regresji krokowej. Wyznaczano współczynniki korelacji i determinacji oraz wartości standardowego błędu estymacji dla poszczególnych równań, odnotowywano poziom istotności zmiennych niezależnych w równaniach, a ponadto oceniana była zgodność wartości danych wyliczonych według otrzymanych równań z rzeczywistymi (między innymi poprzez określenie średniego i maksymalnego błędu względnego). Należy też zaznaczyć, że w dokonanych analizach – z uwagi na mniejszą dostępność danych o promieniowaniu słonecznym – zdecydowano się na rozpatrywanie (oddzielnie) dwóch zestawów danych meteorologicznych: z pominięciem i przy uwzględnieniu sum dziennych tego promieniowania.

WYNIKI

Badania związku między sumami ciepła wnikającego do gleby podczas dnia a poszczególnymi (pojedynczymi) danymi meteorologicznymi wykazały (Kossowski 2001, 2007), że najwyraźniej zaznaczył się on w przypadku sum dziennych promieniowania słonecznego (współczynnik korelacji $r = 0,818$), a następnie amplitud dobowych temperatury powietrza ($r = 0,804$) i usłonecznienia ($r = 0,793$). Związek ten okazał się istotny statystycznie (choć o różnym poziomie) dla niemal wszystkich rozpatrywanych danych (w tym niestandardowych), bo za wyjątkiem tylko temperatury minimalnej i średniej dobowej temperatury powietrza. Nie dyskwalifikowało to jednak tych dwóch danych jako elementów kompleksu warunków pogodowych wpływającego na sumy ciepła wnikającego do gleby (co wykazały dalsze analizy). Warto przy tym zaznaczyć, że wszystkie wspomniane wyżej związki korelacyjne (określone wartościami r) otrzymano mimo oddziaływania na strumień ciepła w glebie innych niż rozpatrywany elementów meteorologicznych. Na podkreślenie zasługuje relatywnie wysoka korelacja sum strumienia ciepła wnikającego do gleby podczas dnia z maksymalną temperaturą powietrza oraz danymi dotyczącymi zmian temperatury powietrza z dnia na dzień, tak średniej dobowej, jak i minimalnej, a zwłaszcza maksymalnej temperatury powietrza. Ilustrują to wykresy na rysunku 1, stanowiące jednocześnie uzupełnienie szeregu wcześniej już prezentowanych (Kossowski 2001).

Związek między ilością ciepła wnikającego do gleby podczas dnia (Σq^+) a warunkami atmosferycznymi charakteryzowanymi poprzez cały zestaw danych meteorologicznych (z pominięciem oraz przy uwzględnieniu sum dziennych promieniowania słonecznego) opisywały następujące równania:

$$\Sigma q^+ = 0,18\Sigma Q_s^{***} - 0,04u_r + 0,06N_o - 0,14V_w^* + 0,06n_w + 2,66aT + 4,67T_d + 0,39\Delta T_d^{***} - 4,83T_{max} - 0,29\Delta T_{max}^{**} + 0,02\Delta T_{min} + 0,02\Delta u_r - 0,402 \quad (1)$$

$$\Sigma q^+ = 0,17u_r^* + 0,1N_o - 0,09V_w + 0,07n_w + 1,62aT + 2,75T_d + 0,32\Delta T_d^{**} - 2,83T_{max} - 0,22\Delta T_{max} - 0,02\Delta T_{min} + 0,03\Delta u_r - 0,103 \quad (2)$$

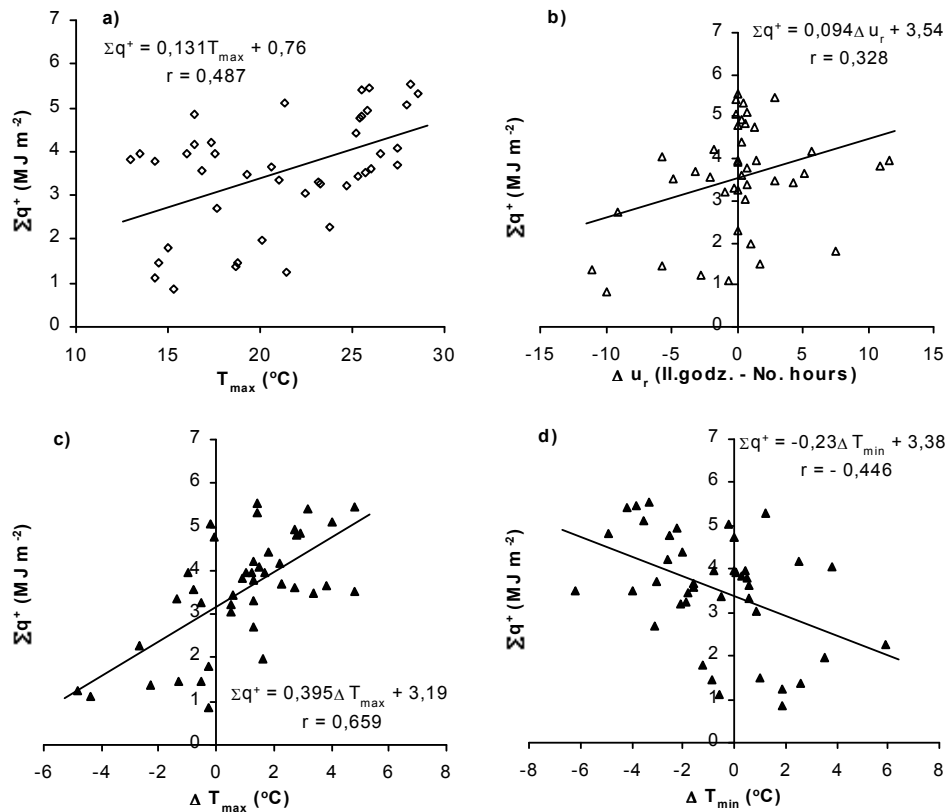
ze współczynnikami determinacji R^2 wynoszącymi (kolejno) 90,23 i 83,66%.

Przy stosowaniu metody regresji krokowej otrzymano – odpowiednio – równania finalne w postaci:

$$\Sigma q^+ = 0,15\Sigma Q_s^{***} - 0,15V_w^{**} + 0,25aT^{***} + 0,35\Delta T_d^{***} - 0,1T_{max}^{***} - 0,24\Delta T_{max}^* + 0,279 \quad (3)$$

$$\Sigma q^+ = 0,15u_r^{***} + 0,16aT^{**} + 0,15\Delta T_d^* + 0,15 \quad (4)$$

z wartościami $R^2 = 88,81\%$ (równanie 3) i $R^2 = 79,4\%$ (równanie 4). Wszystkie te modele są istotne statystycznie, a o poziomie istotności poszczególnych zmiennych informują oznaczenia: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$.



Rys. 1. Sumy strumienia ciepła wnikającego do gleby podczas rozpatrywanych dni (Σq^+) w odniesieniu do: a) maksymalnej temperatury powietrza, T_{max} , b) zmiany usłonecznienia rzeczywistego w porównaniu z dniem poprzednim, Δu_r , c) zmiany maksymalnej temperatury powietrza w porównaniu z dniem poprzednim, ΔT_{max} , oraz d) zmiany w porównaniu z dniem następnym minimalnej temperatury powietrza, ΔT_{min} .

Fig. 1. Sums of heat flux into soil during examined days (Σq^+) versus: a) values of daily maximal air temperature, T_{max} , b) sunshine duration difference between a given and previous day, Δu_r , c) the same difference of maximal air temperature, ΔT_{max} and d) difference of minimal air temperature, ΔT_{min} , between a given and following day

Porównanie wartości współczynników determinacji otrzymanych przy powyższych równaniach pozwala zauważyć znaczący ich wzrost jeśli w zestawie danych meteorologicznych uwzględniane były sumy dzienne promieniowania słonecznego, natomiast w samych równaniach zwraca uwagę niejednakowa waga (poziom istotności) występujących w nich zmiennych, jak również liczba statystycznie istotnych. Za celowe uznano więc przebadanie związku Σq^+ z parametrami meteorologicznymi rozpatrywanymi we wszystkich możliwych układach i przy stopniowo zwiększanej liczbie (od 2 do 8). W ten sposób ustalono równania, które przy danej liczbie zmiennych wykazywały najwyższe wartości współczynnika determinacji, a zatem były by potencjalnie najlepsze do szacowania wartości Σq^+ . Wyniki tych poszukiwań – tj. wyszczególnienie zmiennych wraz z oznaczeniem poziomu istotności dla trzech (w kolejności) takich równań – przedstawiono w tabeli 1 (osobno dla zestawu danych z promieniowaniem słonecznym i bez niego).

W wymienionych w tabeli kombinacjach zmiennych jako istotne statystycznie (choć o różnym poziomie i nie wszystkie na raz) wstępowało w przypadku zestawów bez ΣQ_s 5 danych (u_r , aT , ΔT_d , ΔT_{max} i V_w), a przy uwzględnianiu ΣQ_s 7 danych (oprócz ΣQ_s - aT , ΔT_d , V_w , T_d , T_{max} i ΔT_{max}). W zestawach bez ΣQ_s dane o usłonecznieniu (u_r) stanowiły nieodzowny element charakteryzujący stosunki solarne w danym dniu, mając najwyższy poziom istotności we wszystkich niemal równaniach (za wyjątkiem zawierających też N_o bądź Δu_r), natomiast w zestawach z ΣQ_s nie były (oczywiście) notowane. Po danych ΣQ_s bądź u_r kolejnymi pod względem znaczenia okazały się amplitudy dobowe temperatury powietrza (aT) i - dość nieoczekiwanie - zmiany z dnia na dzień średniej temperatury powietrza (ΔT_d), tworzące najlepsze kombinacje 3 danych meteorologicznych i obecne we wszystkich kombinacjach liczących 4 i więcej zmiennych. Prędkość wiatru (V_w) jako istotna statystycznie zmienna wystąpiła jedynie w 1 równaniu spośród wyszczególnionych przy braku ΣQ_s , ale w większości równań z ΣQ_s (w tym już przy 3 danych oraz wszystkich kombinacjach liczących 5 i więcej zmiennych). Średnia dobowa temperatura powietrza (T_d) występowała w zestawach zawierających ΣQ_s już od 4 zmiennych (i to przeważnie jako istotna statystycznie), a w zestawach bez ΣQ_s dopiero przy 6 zmiennych. Temperatura maksymalna (T_{max}) obecna była w zestawach od 4 danych (stanowiąc w niektórych kombinacjach niejako zamiennik T_d , natomiast przy 7-8 zmiennych występowała jednocześnie z T_d). W wyszczególnionych w tabeli 1 kombinacjach temperatura minimalna (T_{min}) nie wystąpiła, a dane dotyczące zmian tej temperatury (ΔT_{min}) pojawiły się tylko w 1 kombinacji (4 zmienne bez ΣQ_s). Zmiany z dnia na dzień maksymalnej temperatury powietrza (ΔT_{max}) notowano we wszystkich niemal kombinacjach liczących 6 i więcej zmiennych tak z jak i bez ΣQ_s , a także – podobnie jak ΔT_d – w równaniu z 2-ma tylko zmiennymi. Inne standardowe elementy meteorologiczne używane do charakterystyki warunków pogodowych w danym dniu za-

Tabela 1. Kombinacje danych meteorologicznych (bez i z uwzględnieniem sum dziennych promieniowania słonecznego) w równaniach regresji wielokrotnej $\Sigma q^+ = f(x_1, x_2, \dots, x_8)$ dających najwyższe wartości współczynnika determinacji (R^2)
Table 1. Meteorological data combinations (without and with daily sums of solar radiation), use of which as independent variable in multiple regression equations $\Sigma q^+ = f(x_1, x_2, \dots, x_8)$ resulted in the highest values of determination coefficient (R^2)

Zmienne w równaniach – Variables in equations	R^2 (%)	Zmienne w równaniach – Variables in equations	R^2 (%)
u_r^{***}, aT^{***}	75,87	$\Sigma Q_s^{***}, aT^{***}$	78,89
$u_r^{***}, \Delta T_d^{***}$	72,72	$\Sigma Q_s^{***}, \Delta T_{max}^{***}$	75,96
$u_r^{***}, \Delta T_{max}^{**}$	71,82	$\Sigma Q_s^{***}, \Delta T_d^{***}$	75,47
$u_r^{***}, aT^{**}, \Delta T_d^*$	79,40	$\Sigma Q_s^{***}, aT^{***}, \Delta T_d^*$	81,99
$u_r^{***}, aT^{**}, \Delta T_{max}$	77,06	$\Sigma Q_s^{***}, \Delta T_d^{***}, V_w^{**}$	81,20
$u_r^{***}, \Delta T_d^{***}, V_w^*$	76,99	$\Sigma Q_s^{***}, aT^{***}, V_w^*$	80,73
$u_r^{***}, aT^{**}, \Delta T_d^{**}, V_w$	80,98	$\Sigma Q_s^{***}, aT^{**}, \Delta T_d^{**}, V_w^*$	84,34
$u_r^*, aT^{***}, \Delta T_d^{**}, \Delta u_r$	80,29	$\Sigma Q_s^{***}, aT^{***}, \Delta T_d^{**}, T_{max}^*$	84,10
$u_r^{***}, aT^*, \Delta T_d^*, \Delta T_{min}$	79,63	$\Sigma Q_s^{***}, aT^{***}, \Delta T_d^{**}, T_d^*$	84,08
$u_r^{**}, aT^{**}, \Delta T_d^{**}, V_w, \Delta u_r$	81,31	$\Sigma Q_s^{***}, aT^{**}, \Delta T_d^*, V_w^*, T_{max}^*$	86,52
$u_r^{**}, aT^{**}, \Delta T_d^*, V_w, N_o$	81,21	$\Sigma Q_s^{***}, aT^{**}, \Delta T_d^{**}, V_w^*, T_d^*$	86,51
$u_r^{***}, aT^{**}, \Delta T_d^*, V_w, \Delta T_{max}$	81,19	$\Sigma Q_s^{***}, aT^{**}, \Delta T_d^{**}, V_w^*, n_w$	85,41
$u_r^{***}, aT^{**}, \Delta T_d^*, V_w, T_{max}, \Delta T_{max}$	81,91	$\Sigma Q_s^{***}, aT^{***}, \Delta T_d^{**}, V_w^{**}, T_{max}^{***}, \Delta T_{max}^*$	88,81
$u_r^{***}, aT^{**}, \Delta T_d^*, V_w, T_d, \Delta T_{max}$	81,90	$\Sigma Q_s^{***}, aT^{***}, \Delta T_d^{**}, V_w^{**}, T_d^{***}, \Delta T_{max}^*$	88,78
$u_r^*, aT^{**}, \Delta T_d^*, V_w, \Delta T_{max}, \Delta u_r$	81,88	$\Sigma Q_s^{***}, aT, \Delta T_d^{***}, V_w^*, T_d, T_{max}$	87,16
$u_r^*, aT^{**}, \Delta T_d^{**}, V_w, T_{max}, \Delta T_{max}, \Delta u_r$	82,61	$\Sigma Q_s^{***}, aT, \Delta T_d^{***}, V_w^*, T_d, T_{max}, \Delta T_{max}^*$	89,23
$u_r^*, aT^{**}, \Delta T_d^{**}, V_w, T_d, \Delta T_{max}, \Delta u_r$	82,60	$\Sigma Q_s^{***}, aT^{***}, \Delta T_d^{***}, V_w^{**}, N_o, T_{max}^{***}, \Delta T_{max}^{**}$	89,18
$u_r^{**}, aT^{**}, \Delta T_d^*, V_w, N_o, T_{max}, \Delta T_{max}$	82,44	$\Sigma Q_s^{***}, aT^{***}, \Delta T_d^{***}, V_w^{**}, N_o, T_d^{***}, \Delta T_{max}^{**}$	89,16
$u_r^*, aT^{**}, \Delta T_d^{**}, V_w, N_o, T_{max}, \Delta T_{max}, \Delta u_r$	82,98	$\Sigma Q_s^{***}, aT, \Delta T_d^{***}, V_w^*, N_o, T_d, T_{max}, \Delta T_{max}^{**}$	89,67
$u_r^*, aT^{**}, \Delta T_d^{**}, V_w, N_o, T_d, \Delta T_{max}, \Delta u_r$	82,98	$\Sigma Q_s^{***}, aT^{***}, \Delta T_d^{***}, V_w^{**}, N_o, n_w, T_{max}^{**}, \Delta T_{max}^{**}$	89,48
$u_r^*, aT, \Delta T_d^{**}, V_w, T_d, T_{max}, \Delta T_{max}, \Delta u_r$	82,82	$\Sigma Q_s^{***}, aT^{***}, \Delta T_d^{***}, V_w^{**}, N_o, n_w, T_d^{**}, \Delta T_{max}^{**}$	89,44

Objaśnienie: ΣQ_s – sumy dzienne promieniowania słonecznego ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$), u_r – usłonecznienie rzeczywiste (h), N_o – średnie dzienne zachmurzenie (0-10), V_w – śr. prędkość wiatru ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), n_w – niedosyt wilgotności powietrza (hPa), T_d – śr. temperatura powietrza ($^{\circ}\text{C}$), T_{max} – temp. maksymalna, T_{min} – temp. minimalna ($^{\circ}\text{C}$), aT – amplituda dobowej temperatury ($^{\circ}\text{C}$), Δu_r – różnica usłonecznienia między danym a poprzednim dniem (h), ΔT_d i ΔT_{max} – różnice średniej i maksymalnej temperatury powietrza między danym a poprzednim dniem ($^{\circ}\text{C}$), ΔT_{min} – różnica minimalnej temperatury powietrza między danym a następnym dniem ($^{\circ}\text{C}$); znak ***, ** i * informuje, że poziom istotności (p) danej zmiennej jest mniejszy odpowiednio niż 0,001, 0,01 i 0,05.

Explanation of symbols: ΣQ_s – daily sum of solar radiation ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$), u_r – sunshine duration (hours), N_o – mean cloudiness for day (0-10), V_w – mean wind speed ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), n_w – air saturation deficit (hPa), T_d – mean air temperature ($^{\circ}\text{C}$), T_{max} – maximum, T_{min} – minimum air temperature ($^{\circ}\text{C}$), aT – air temperature daily amplitude ($^{\circ}\text{C}$), Δu_r – sunshine duration difference between a given and previous day (hours), ΔT_d and ΔT_{max} – mean and maximum air temperature differences between a given and previous day ($^{\circ}\text{C}$), ΔT_{min} – minimum air temperature difference between a given and following day ($^{\circ}\text{C}$); signs ***, ** and * inform that significance level (p) at given variable is smaller than 0.001, 0.01 and 0.05, respectively.

Tabela 2. Błędy szacowania wartości Σq^+ na podstawie równań wyznaczonych w oparciu o różną liczbę danych meteorologicznych (tylko równania dające najlepsze przybliżenie, tj. najwyższe wartości R^2 , a najniższe wartości standardowego błędu estymacji SEE).

Table 2. Errors of estimation of Σq^+ values using the regression equations obtained based on different numbers of meteorological data (taken into consideration are only the equations with the highest values of R^2 and smallest values of standard error of estimation, SEE).

Równanie – Equation	SEE (MJ m ⁻²)	Błąd względny szacow. (%) Relative error of estimation		Różnica – Difference $\Sigma q^+_{obs} - \Sigma q^+_{pred}$ (MJ m ⁻²)	
		średni mean	maksymalny maximal	średnia mean	największa greatest
$\Sigma q^+ = f(aT)$	0,780	21,7	110,7	0,601	1,88
$\Sigma q^+ = f(u_{r_s}, aT)$	0,652	16,3	87,8	0,508	1,54
$\Sigma q^+ = f(u_{r_s}, aT, \Delta T_d)$	0,610	16,1	61,5	0,490	1,13
$\Sigma q^+ = f(u_{r_s}, aT, \Delta T_d, V_w)$	0,595	15,2	53,4	0,486	1,18
$\Sigma q^+ = f(u_{r_s}, aT, \Delta T_d, V_w, \Delta u_r)$	0,597	14,6	58,1	0,474	1,16
$\Sigma q^+ = f(u_{r_s}, aT, \Delta T_d, V_w, T_{max}, \Delta T_{max})$	0,596	13,8	49,3	0,455	1,18
$\Sigma q^+ = f(u_{r_s}, aT, \Delta T_d, V_w, T_{max}, \Delta T_{max}, \Delta u_r)$	0,593	13,2	56,1	0,433	1,21
$\Sigma q^+ = f(u_{r_s}, aT, \Delta T_d, V_w, N_o, T_{max}, \Delta T_{max}, \Delta u_r)$	0,595	13,8	56,1	0,439	1,11
$\Sigma q^+ = f(u_{r_s}, aT, \Delta T_d, V_w, N_o, n_w, T_d, T_{max}, \Delta T_{max}, \Delta T_{min}, \Delta u_r)$	0,612	12,9	48,0	0,421	1,14
$\Sigma q^+ = f(\Sigma Q_s)$	0,754	19,4	87,3	0,570	1,99
$\Sigma q^+ = f(\Sigma Q_s, aT)$	0,610	15,1	68,2	0,461	1,57
$\Sigma q^+ = f(\Sigma Q_s, aT, \Delta T_d)$	0,571	14,7	43,2	0,451	1,10
$\Sigma q^+ = f(\Sigma Q_s, aT, \Delta T_d, V_w)$	0,539	13,1	46,0	0,430	1,01
$\Sigma q^+ = f(\Sigma Q_s, aT, \Delta T_d, V_w, T_{max})$	0,507	12,3	41,9	0,392	0,98
$\Sigma q^+ = f(\Sigma Q_s, aT, \Delta T_d, V_w, T_{max}, \Delta T_{max})$	0,469	11,1	32,1	0,355	0,92
$\Sigma q^+ = f(\Sigma Q_s, aT, \Delta T_d, V_w, T_d, T_{max}, \Delta T_{max})$	0,467	10,9	38,1	0,348	0,91
$\Sigma q^+ = f(\Sigma Q_s, aT, \Delta T_d, V_w, N_o, T_d, T_{max}, \Delta T_{max})$	0,464	11,0	41,7	0,344	0,87
$\Sigma q^+ = f(\Sigma Q_s, aT, \Delta T_d, V_w, N_o, n_w, u_{r_s}, T_d, T_{max}, \Delta T_{max}, \Delta T_{min}, \Delta u_r)$	0,481	11,0	42,9	0,335	0,91

Objaśnienie symboli jak w tabeli 1 – Explanation of symbols as in Table 1.

chmurzenie, N_o i niedosyt wilgotności powietrza, n_w) znajdowały miejsce dopiero w zestawach liczących 7 lub 8 zmiennych (choć N_o także w najlepszym równaniu z 5 zmiennymi bez ΣQ_s). Ostatnia z nietypowych danych – zmiany usłonecznienia w porównaniu z dniem poprzednim (Δu_r) – występowały tylko w kombinacjach bez ΣQ_s , poczynając od zestawów 4 zmiennych.

Z kolei analizując podane w tabeli 1 wartości współczynników determinacji (R^2) można zauważyć, że wraz ze zwiększaniem liczby użytych danych (zmiennych w równaniach) wzrastały one coraz mniej, a od pewnej ich liczby już zupełnie nieznacznie: w zestawie bez ΣQ_s przy powiększeniu liczby zmiennych z 4 do 5, natomiast w zestawie obejmującym ΣQ_s przy wzroście zmiennych z 6 do 7. Poza tym, dla równań w obrębie określonej liczby zmiennych wartości R^2 różniły się znacznie gdy danych było tylko 2 lub 3, a gdy zmiennych było więcej – były one coraz bardziej (w końcu niemal zupełnie) wyrównane. Na podkreślenie zasługuje spostrzeżenie, że wartość R^2 (79,4%) dla równania (4) otrzymanego metodą regresji krokowej dla zestawu danych bez ΣQ_s (a zawierającego tylko 3 zmienne istotne statystycznie) jest znacząco mniejsza od zanotowanych przy większej liczbie danych wyjściowych. Toteż – w przeciwieństwie do równania (3) otrzymanego tą metodą (z 6 zmiennymi istotnymi statystycznie łącznie z ΣQ_s) – wykorzystywanie tego równania do szacowania ilości ciepła wnikającego do gleby podczas dnia (Σq^+) nie wydaje się być racjonalne. Bardziej wszechstronnie uzasadnionego wyboru optymalnych w tym względzie równań będzie można dokonać po przeprowadzeniu analizy dokładności szacowania wartości Σq^+ w oparciu o powszechnie znane ilościowe miary zgodności danych (standardowy błąd estymacji, średni i maksymalny błąd względny) oraz różnice wartości wyliczonych z równań z uzyskanymi drogą pomiarów. Dane takie zestawiono w tabeli 2, ograniczając się tylko do równań dających – przy danej liczbie zmiennych - najwyższe wartości współczynnika determinacji (*vide* tab. 1), ale też uwzględniając równania (1) i (2) otrzymane przy użyciu pełnych zestawów danych meteorologicznych.

Przy przeglądzie tych danych można zauważyć, że standardowy błąd szacowania wartości Σq^+ (SEE) zmniejszał się wraz ze zwiększeniem liczby danych meteorologicznych użytych do konstrukcji równań tylko do pewnej ich liczebności: w zestawach bez ΣQ_s najmniejszy błąd ($0,593 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) stwierdzono przy 7 danych (u_r , aT , ΔT_d , V_w , T_{max} , ΔT_{max} i Δu_r), a w zestawach z ΣQ_s ($0,464 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) przy 8 danych meteorologicznych (ΣQ_s , aT , ΔT_d , V_w , N_o , T_d , T_{max} i ΔT_{max}). Zastosowanie większej liczby danych prowadziło do wzrostu – co prawda niewielkiego – tego błędu. Względny błąd szacowania wartości Σq^+ z danych bez ΣQ_s – tak średni jak i maksymalny – okazał się najmniejszy przy korzystaniu z równań o największej liczbie zmiennych, natomiast w przypadku równań uwzględniających ΣQ_s naj-

mniejszy średni błąd względny zanotowano przy zestawie 7 zmiennych (10,9%), a najmniejszy błąd maksymalny – 6 zmiennych (32,1%). Generalnie, uwzględnienie w zestawie danych ΣQ_s skutkowało znaczącym zmniejszeniem wszystkich tych błędów. Odnośnie różnic między zaobserwowanymi a oszacowanymi wartościami Σq^+ stwierdzono, że jeśli weźmie się pod uwagę ich wartości uśrednione dla rozpatrywanego materiału obserwacyjnego to były one najmniejsze przy korzystaniu z równań zawierających pełne zestawy danych meteorologicznych, wynosząc 0,42 i 0,34 MJ·m⁻² dla zestawu bez i z uwzględnieniem ΣQ_s . Największe zaś różnice – odpowiednio - wynosiły najmniej 1,1 bądź 0,9 MJ·m⁻², pozostając na tym mniej więcej poziomie w przypadku równań zawierających 3 i więcej zmiennych (zestawy bez ΣQ_s) lub 6 zmiennych (zestawy z ΣQ_s).

Przeprowadzona analiza błędów szacowania wielkości Σq^+ przy stosowaniu poszczególnych (wymienionych w tab. 1 i 2) równań wykazała, że najlepszymi (dającymi najmniejsze błędy) są równania z 7 i 8 zmiennymi, w tym ΣQ_s . Jako optymalny model, pozwalający na uzyskanie możliwie najmniejszych błędów przy najmniejszej liczbie danych wyjściowych, należy jednak uznać ten z 7 zmiennymi, otrzymany w postaci:

$$\Sigma q^+ = 0,15\Sigma Q_s - 0,14V_w + 2,04aT + 3,58T_d + 0,36\Delta T_d - 3,68T_{max} - 0,23\Delta T_{max} + 0,218 \quad (5)$$

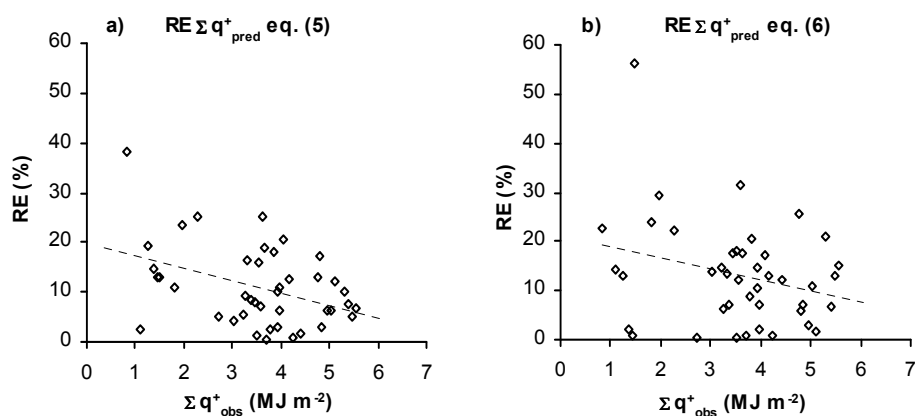
Do jego wyznaczenia potrzebne są tylko 4 dane pomiarowe: sumy dzienne promieniowania słonecznego, prędkość wiatru oraz maksymalna i minimalna temperatura powietrza (przy przyjęciu sposobu obliczania średniej dobowej temperatury z wartości jej ekstremów). Warto dodać, że błędy względne szacowania wartości Σq^+ z tego równania są mniejsze niż z równania zawierającego 8 zmiennych (w tym N_o), a błąd standardowy i różnice między wartościami strumienia wyliczonymi i obserwowanymi zbliżone. Natomiast w porównaniu do błędów przy korzystaniu z równania (3) wyznaczonego metodą regresji krokowej – są one mniejsze niemal w każdym z tu analizowanych (za wyjątkiem maksymalnego błędu względnego).

Jeśli nie dysponuje się danymi dotyczącymi promieniowania słonecznego (ΣQ_s), jako optymalny model do szacowania wielkości Σq^+ (też oparty na 4 danych pomiarowych) można przyjąć równanie:

$$\Sigma q^+ = 0,11u_r - 0,09V_w + 0,25aT + 0,31\Delta T_d - 0,04T_{max} - 0,19\Delta T_{max} + 0,04\Delta u_r + 0,566 \quad (6)$$

Uzasadnia to najmniejszy spośród uzyskanych dla równań z zestawem danych bez ΣQ_s standardowy błąd szacowania, jak i relatywnie niskie wartości średniego błędu względnego oraz różnic między obserwowanymi a wyliczonymi za pomocą tego równania wartości Σq^+ . Należy ponadto podkreślić, że współczynniki determinacji (R^2) zarówno dla równania (5) jak i (6) są już bardzo bliskie najwyższemu,

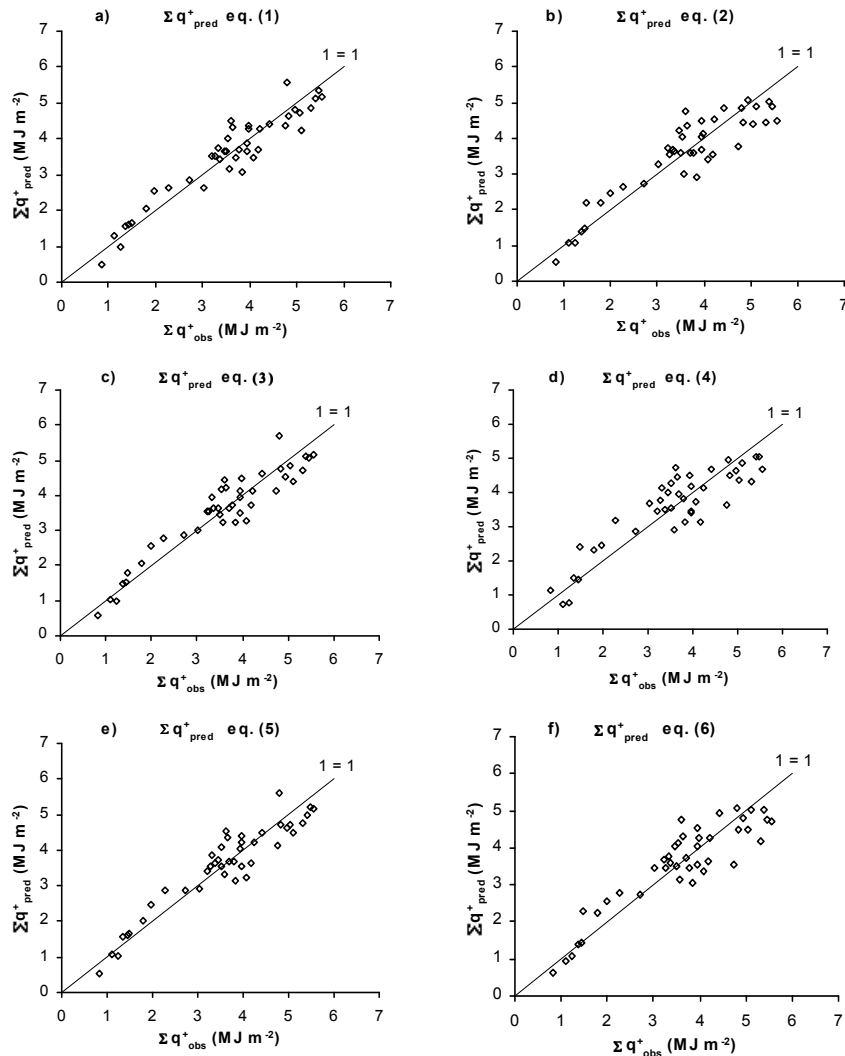
otrzymanym dla równań (1) i (2) przy korzystaniu z wszystkich uwzględnianych w opracowaniu danych meteorologicznych (tylko o 1% mniejsze). Pewien pogląd na dokładność szacowania sum strumienia ciepła wnikającego podczas dnia do gleby za pomocą równania (5) i (6), a ściślej – wielkość otrzymywanych błędów względnych, dają wykresy na rysunku 2.



Rys. 2. Błędy względne (RE) wyestymowanych przy użyciu równania (5) i (6) sum strumienia ciepła wnikającego podczas dnia do gleby (Σq^+_{pred}) odniesione do rzeczywistych, otrzymanych z pomiarów wielkości tych sum (Σq^+_{obs}).

Fig. 2. Relative errors (RE) of daily sums of heat flux into soil (Σq^+_{pred}) estimated using equations (5) and (6) versus measured values (Σq^+_{obs}).

Zgodność wielkości Σq^+ uzyskanych w pomiarach z obliczonymi przy użyciu równań (1) i (2), równań otrzymanych przy zastosowaniu metody regresji krokowej (3) i (4) oraz sugerowanych jako optymalne (5) i (6) – przedstawiają wykresy zamieszczone na rysunku 3. Już przy pobieżnym ich porównaniu widoczna jest wyraźnie lepsza dokładność szacowania sum dziennych strumienia ciepła przy stosowaniu równań uwzględniających wśród zmiennych sumy dobowe promieniowania słonecznego niż uzyskana z równań bez tych danych (i to niezależnie od liczby innych danych meteorologicznych występujących w równaniach). Jednak przy bardziej wnikliwej analizie wykresów można dostrzec inną prawidłowość (być może wadę metody), że przy dużych sumach strumienia (rzędu $5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ i więcej) otrzymywane za pomocą każdego z tych modeli wielkości Σq^+ są przeważnie niedoszacowane (zbyt małe).



Rys. 3. Porównanie dziennych sum strumienia ciepła wnikającego do gleby uzyskanych drogą pomiarów (Σq^+_{obs}) z obliczonymi (Σq^+_{pred}) według równań (1) i (2) wyznaczonych w oparciu o pełne zestawy danych meteorologicznych z uwzględnieniem sum dobowych promieniowania słonecznego (wykres a) i bez tych sum (wykres b), według równań (3) i (4) wyznaczonych metodą regresji krokowej przy korzystaniu z tychże zestawów danych (odpowiednio – wykres c i d) oraz według równań (5) i (6) przyjętych za optymalne (wykresy e i f)

Fig. 3. Comparison of measured daily sums of heat flux into soil (Σq^+_{obs}) and those calculated (Σq^+_{pred}) using equations (1) and (2) obtained on the basis of complete meteorological data together with daily sums of solar radiation (graph a) and without these sums (graph b), using equations (3) and (4) determined by stepwise regression method from the same data (graph c and d, respectively) and also equations (5) and (6) considered as optimal (graph e and f)

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Do zagadnienia szacowania dziennych sum strumienia ciepła wnikającego do gleby na podstawie danych meteorologicznych (w tym dochodzenia do możliwie najlepszych w tym względzie rozwiązań) podchodzono w sposób systematyczny, acz stopniowo. Ustalono jakie elementy meteorologiczne wpływają na wielkość tych sum (najbardziej i bezpośrednio – promieniowanie słoneczne, pośrednio – usłonecznienie, zachmurzenie i prędkość wiatru) lub wykazują istotny z nimi związek (amplituda dobową temperatury powietrza, temperatura średnia i maksymalna, niedosyt wilgotności powietrza). Ponadto wykazano, że w znaczący sposób może na nie oddziaływać zmiana warunków pogodowych z dnia na dzień, charakteryzowana przez różnice (w porównaniu z dniem poprzednim) usłonecznienia oraz temperatury powietrza. Aby uzyskać w miarę pełny obraz możliwości i efektywności szacowania sum ciepła wnikającego podczas dnia do gleby w oparciu o dane meteorologiczne, wyznaczono całą gamę równań regresji liniowej wielokrotnej, w których jako zmienne niezależne przyjmowano różną liczbę i rozmaite kombinacje tych danych (w wariacie bez i z uwzględnieniem sum dziennych promieniowania słonecznego). Przeprowadzona następnie analiza błędów popełnianych przy korzystaniu z tych równań pozwoliła na ustalenie modeli optymalnych, tj. dających najmniejsze błędy przy najmniejszej liczbie danych wyjściowych.

Najważniejsze z dokonanych spostrzeżeń i wnioski są następujące.

1. Przy szacowaniu sum strumienia ciepła wnikającego podczas dnia do gleby nie jest konieczne korzystanie z możliwie szerokiego wachlarza danych meteorologicznych; wystarczająco już dobre (bądź nawet lepsze) efekty uzyskuje się stosując tylko kilka z nich, odpowiednio i stosownie do okoliczności dobranych. Najbardziej cenne (istotne) są dane o promieniowaniu słonecznym (sumy dobowe), a przy ich braku usłonecznienie rzeczywiste. Oprócz standardowych należy też uwzględniać nietypowe – choć z nich obliczane – dane meteorologiczne (zmiany z dnia na dzień wybranych elementów).

2. Sugerowany jako optymalny zestaw danych obejmuje ich 7: sumy dzienne promieniowania słonecznego, prędkość wiatru, amplitudę dobową temperatury powietrza, temperaturę średnią dobową i maksymalną oraz zmiany tych temperatur w porównaniu z dniem poprzednim. Analogiczny zestaw bez danych o promieniowaniu zawiera – zamiast nich – usłonecznienie i jego zmianę w porównaniu z dniem poprzednim. Co ważne, do skompletowania tych zestawów potrzebne są tylko 4 dane pomiarowe: sumy dzienne promieniowania słonecznego lub usłonecznienie, prędkość wiatru oraz maksymalna i minimalna temperatura powietrza (przy przyjęciu sposobu obliczania średniej dobowej temperatury z wartości jej ekstremów).

3. Możliwa do osiągnięcia dokładność szacowania dziennych sum strumienia ciepła wnikającego do gleby na podstawie danych meteorologicznych (w tym sum dziennych promieniowania słonecznego) to: standardowy błąd estymacji niewiele mniejszy niż $0,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, błąd względny średni około 11%, a maksymalny ponad 30%. Największe różnice między oszacowanymi sumami ciepła wnikającego podczas dnia do gleby a występującymi rzeczywistość mogą jednak (w pojedynczych dniach) sięgać $1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$. Jeśli nie dysponuje się danymi o promieniowaniu przy konstruowaniu równań – błędy szacowania strumienia ciepła będą większe.

4. Przedstawione w pracy wyniki (określonej postaci równania, zwłaszcza występujące w nich współczynniki liczbowe) – jako że uzyskano je w oparciu o materiał obserwacyjny odnoszący się tylko do dni bezopadowych w okresie wiosenno-letnim i do określonych warunków środowiskowych (pole bez roślin, gleba lessopodobna) – nie mają charakteru uniwersalnego, tj. są nie do wykorzystania w innym miejscu i czasie. Jednakże – w aspekcie poznawczym i metodycznym – mogą stanowić odniesienie (także przykład trybu postępowania) przy podejmowaniu tego typu badań.

PIŚMIENNICTWO

- Dąbrowska-Zielińska K., 1995. Szacowanie ewapotranspiracji, wilgotności gleby i masy zielonej łąk na podstawie zdjęć satelitarnych NOAA. IGiPZ PAN, Prace geogr. 165, 1-82.
- Kapuściński J., 2000. Struktura bilansu cieplnego powierzchni czynnej na tle warunków klimatycznych środkowozachodniej Polski. Roczn. AR w Poznaniu, Rozpr.Nauk. 303, 1-250.
- Kapuściński J., Moczko J., 1990. Udział strumienia ciepła w glebie w strukturze bilansu cieplnego powierzchni czynnej. Zesz. Nauk. AR w Krakowie, 246, 117-129.
- 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., 2001. 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., 2007. O relacji między strumieniem ciepła w glebie a promieniowaniem słonecznym. Acta Agrophysica, 10(1), 121-135.
- Leśny J., Olejnik J., Stanikowska M., 2001. Wpływ ogólnych warunków meteorologicznych na wartość stosunku Bowena i strukturę bilansu cieplnego powierzchni czynnej pozbawionej żywej roślinności. Roczn. AR w Poznaniu, Melior. Inż. Środ., 21, 137-141.
- Tuchołka S., Moczko J., 2001. Zależność salda promieniowania i ciepła glebowego od różnicy temperatury radiacyjnej powierzchni czynnej i temperatury powietrza. Roczn. AR w Poznaniu, 329, Melior. Inż. Środ., 21, 209-216.

POSSIBILITIES AND ACCURACY OF ESTIMATION
OF HEAT FLUX INTO SOIL DURING A DAY ON THE BASIS
OF METEOROLOGICAL DATA

Jan Kossowski

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

Abstract. The paper is concerned with the influence of weather conditions on heat exchange by soil surface, and in particular – on the sum of heat flux into soil during daylight. The observational materials were collected during 42 days without precipitation in several May-July periods on experimental fields with bare soil at Felin near Lublin. The regression equations describing relations of the daily sums of heat flux into soil with meteorological data, as treated separately and together (various combinations contained from 2 to 12 of the data, at variants without and with daily sum of solar radiation), including the determination coefficients and the significance level of variables were established. Moreover, the values of standard and relative errors of estimation of the daily sums of soil heat flux using the equations were calculated. Analysis of all the parameters permitted to select the best (optimal) regression equations, i.e. with the smallest errors of estimation of the daily sums of heat flux into soil on the basis of minimum number of meteorological data. The equation recommended as most favourable to use contained seven variables (daily sum of solar radiation, daily mean of wind speed, air temperature daily amplitude, mean and maximum air temperatures, differences of mean and maximum air temperatures between a given and previous day), but only three of them (radiation, wind speed and air temperature) are required to be measured. By using this equation it is possible to estimate daily heat flux sums into soil with accuracy as follows: standard error about 0.47 MJ m^{-2} , mean and maximal relative errors 11% and above 30%, respectively.

Key words: soil heat flux, estimation, meteorological data