

ZWIĄZEK TEMPERATURY PRZYPOWIERZCHNIOWEJ WARSTWY GLEBY Z TEMPERATURĄ POWIETRZA I WŁAŚCIWOŚCIAMI FIZYCZNYMI GLEBY

J. Kossowski

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27
e-mail: jkoss@demeter.ipan.lublin.pl

Streszczenie. Celem pracy było określenie wpływu wilgotności oraz poszczególnych właściwości cieplnych gleby na kształtowanie się związku między temperaturą przypowierzchniowej warstwy gleby (na głębokości 1 i 5 cm) a temperaturą powietrza. Opracowanie oparto na danych Obserwatorium Agrometeorologicznego w Felinie (temperatura powietrza mierzona na wysokości 2 m) oraz uzyskanych w pomiarach prowadzonych podczas kilku lat (w miesiącach maj – lipiec) na przylegających do niego poletkach doświadczalnych bez roślin. Wyznaczone zostały równania zależności dla wartości temperatur średnich dobowych, minimalnych i maksymalnych w ciągu dnia z pominięciem i przy uwzględnianiu właściwości gleby, po czym analizowano współczynniki determinacji oraz oceniano zgodność wartości temperatur wyliczanych według tych równań z uzyskanymi w pomiarach. Stwierdzono, że uwzględnianie właściwości gleby przy określaniu zależności między temperaturą powietrza i gleby prowadzi do jej uściślenia, a szacowane w oparciu o takie zależności dane dotyczące temperatury gleby obarczone są mniejszym błędem niż przy stosowaniu równań zależności jedynie od temperatury powietrza.

Słowa kluczowe: temperatura gleby, temperatura powietrza, właściwości cieplne gleby, wilgotność gleby.

WSTĘP

Stosunki termiczne gleby na tle warunków atmosferycznych, w tym powiązanie temperatury gleby i powietrza, badane były przez agroklimatologów od dawna. Związek między wartościami średnimi dobowymi, miesięcznymi czy sezonowymi tych temperatur okazał się na tyle wyraźny, że mógł stanowić podstawę wyznaczania temperatury gleby na różnych głębokościach w oparciu

o dane temperatury powietrza mierzonej na stacjach meteorologicznych (na standardowej wysokości 2 m) [3,4,9,11,16,17,20,21,23]. Określanie tego związku miało zatem duże znaczenie praktyczne, jako metody pozyskiwania danych dla stacji lub terenów gdzie temperatura gleby nie była mierzona. Przykładem takiego podejścia jest praca Paneckiej [20] dotycząca obszaru Polski, ale było ono stosowane i w innych krajach [23, 28]. Korzystano także z niego w modelowych badaniach struktury bilansu cieplnego [19].

Warto dodać, że związek temperatury gleby i powietrza opisywano równaniem prostej, a ponadto zauważane były różnice we współczynnikach równań związane z położeniem stacji lub rodzajem gleby [4,9,23]. Jednakże, wobec znacznie większego zróżnicowania wartości tych współczynników w czasie (np. między miesiącami) niż między stacjami, oddziaływanie czynnika środowiskowego (w tym cech gleby) uznawano za mniej istotne (pomijalne) w porównaniu do roli warunków atmosferycznych w kształtowaniu stosunków termicznych gleby. Tymczasem rezultaty wielu badań o charakterze porównawczym wskazują na znaczący wpływ właściwości fizycznych gleby (wilgotności, gęstości i związanych z nimi właściwości cieplnych gleby) na jej temperaturę, zwłaszcza w przypadku pól uprawnych [1,2,12,15,27]. Zatem uwzględnianie stanu fizycznego gleby w badaniach związku między temperaturą gleby i powietrza może prowadzić do jego uściślenia.

Oprócz badania relacji temperatura gleby – temperatura powietrza w oparciu o wartości średnie dla doby czy miesiąca, podejmowane były próby określenia związku dla wartości temperatur z poszczególnych terminów obserwacyjnych [8], a także między ekstremami dobowymi temperatury gleby a ekstremami temperatury powietrza (tj. temperaturą maksymalną i minimalną) [5,6,7,13,18]. Tego rodzaju badania są ważne przede wszystkim w agrometeorologii, gdyż dają możliwość uzyskania informacji o przedziale zmian temperatury gleby podczas doby, co - w połączeniu z wartością średnią - pozwala otrzymać o wiele pełniejszy obraz warunków termicznych panujących w glebie. Jednocześnie, oszacowane z relacji statystycznych wartości temperatury przy powierzchni gleby (np. na poziomie 1 cm) mogą być przyjmowane jako dane wyjściowe (warunki brzegowe) do modelowania przepływu ciepła w glebie [10, 22, 29].

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie związku między temperaturą powierzchniowej warstwy gleby (na głębokości 1 i 5 cm) a temperaturą powietrza (w tym wartości średnich oraz ekstremów dobowych), w przypadku pomijania bądź uwzględniania przy tym właściwości fizycznych gleby.

MATERIAŁ I METODY

Materiał obserwacyjny zebrano w trakcie badań prowadzonych w sezonach wegetacyjnych lat 1978, 1979, 1987, 1989, 1992 i 1993 na poletkach doświadczalnych w Felinie koło Lublina (z glebą płową, lessopodobną). Poletka te usytuowane były tuż obok Obserwatorium Agrometeorologicznego lubelskiej Akademii Rolniczej, skąd uzyskano dane o temperaturze powietrza (wartości średnie dobowe oraz maksymalne i minimalne w danym dniu). Dane dotyczące temperatury gleby jakimi posłużono się w niniejszej pracy pochodziły z poletek utrzymywanych w ciągu całego sezonu w stanie tzw. „czarnego ugoru”. W latach 1978 i 1979 pomiary temperatury były prowadzone na jednym takim poletku (termometrami rtęciowymi), natomiast w roku 1987 na trzech, a w pozostałych latach na dwóch poletkach o różnym zagęszczeniu gleby (za pomocą wieloczuJNIKOWYCH termometrów termoelektrycznych [13]). Okresowo (w seriach kilkunastodniowych) lub tylko w wybranych dniach (w sezonach 1987-1993) prowadzone całodobowe pomiary temperatury gleby pozwoliły na ustalenie jej ekstremów w przebiegach dobowych (tj. temperatury minimalnej i maksymalnej) dla kilkudziesięciu dni, z których do analiz wybrano 42. Były to wyłącznie dni bez opadów atmosferycznych (kryterium wyboru), ale poza tym reprezentowały różne warunki pogodowe. Wśród nich znalazło się 14 dni z miesiąca maja, 11 z czerwca i 17 z lipca, a łącznie – uwzględniając dane z poletek o różnym zagęszczeniu gleby – materiał służący za podstawę przeprowadzonych analiz stanowiło 53 par danych. Dodatkowo, tylko w przypadku wartości średnich dobowych temperatury powietrza i gleby, wykorzystane zostały dane z wszystkich dni okresu maj – lipiec 1978 i 1979 roku.

Oprócz pomiarów temperatury, na każdym poletku określana była wilgotność gleby (metodą grawimetryczną), a także gęstość gleby (w warstwach o miąższości 5 cm). Wartości objętościowej pojemności cieplnej gleby (C_v) obliczano metodą de Vriesa [26], przewodnictwa cieplnego gleby (λ) według modelu statystyczno-fizycznego Usowicza [24, 25], a wartości przewodnictwa temperaturowego (k) i współczynnika przyswajalności cieplnej gleby (b_c) – jako kombinacje dwóch pierwszych właściwości cieplnych: $k = \lambda / C_v$; $b_c = (\lambda C_v)^{1/2}$.

Związek temperatury gleby i powietrza opisywano równaniem regresji liniowej typu

$$y = a + bx$$

a temperatury gleby z temperaturą powietrza i poszczególnymi własnościami gleby równaniem

$$y = a + bx_1 + cx_2 + \dots + gx_6$$

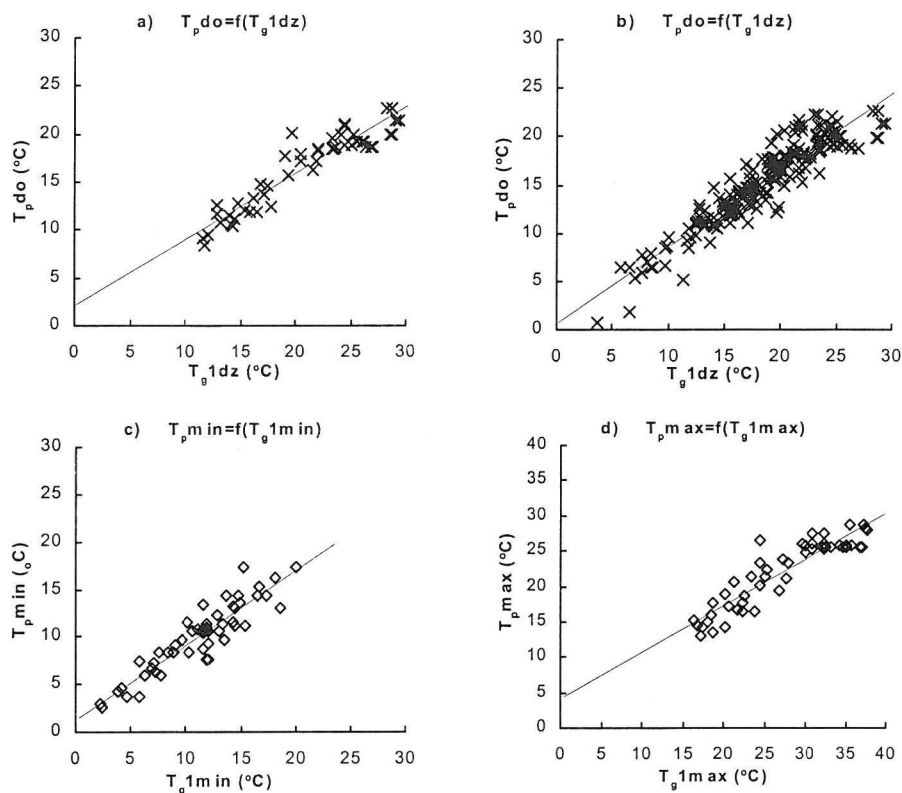
w których y oznacza temperaturę gleby (T_g) na głębokości $z = 1$ lub $z = 5$ cm, x oraz x_1 – temperaturę powietrza mierzoną w klatce meteorologicznej (T_p), x_2 do x_6 – średnie dla warstwy 0-5 cm wartości określonej właściwości gleby, tj. wilgotności (W), objętościowej pojemności cieplnej (C_v), współczynnika przewodnictwa cieplnego (λ) i temperaturowego (k) oraz przyswajalności cieplnej gleby (b_c), a , b , ... g – współczynniki liczbowe. W przeprowadzonych analizach stosowano metodę regresji krokowej, pozwalającej na znalezienie modeli ze zredukowaną do istotnych statystycznie liczbą parametrów. Następnie oceniana była zgodność (dokładność przybliżenia) wartości temperatury gleby wyliczanych według otrzymanych równań z uzyskanymi w pomiarach, stosując przy tym powszechnie znane miary ilościowe (średni i maksymalny błąd względny, średni błąd kwadratowy).

WYNIKI

Przed przystąpieniem do omówienia wyników dotyczących związku wartości temperatury gleby i powietrza, warto poczynić następujące uwagi. Pierwsza odnosi się do samego związku temperatur tych dwóch ośrodków. Z reguły (pomijając szczególne przypadki adwekcji mas powietrznych), to od powierzchni gleby nagrzewającej się w wyniku dopływu promieniowania słonecznego ogrzewa się przygruntowa warstwa powietrza, czyli to temperatura powietrza (T_p) jest zależna od temperatury gleby (T_g). Przypomnienie natury tego związku, tj. że $T_p = f(T_g)$, uznano za celowe wobec korzystania z odwrotnej zależności przy szacowaniu temperatury gleby w oparciu o dane temperatury powietrza. Druga uwaga dotyczy niejednakowego sposobu obliczania średniej dobowej, bowiem – zgodnie z ogólnie przyjętymi zasadami – w przypadku temperatury powietrza korzystano przy tym z pomiarów w 4 terminach obserwacyjnych, a temperatury gleby – z trzech terminów. Konsekwencją tego jest niepełne przystawanie do siebie danych, jako że tak obliczona średnia temperatura gleby charakteryzuje bardziej okres dzienny jej przebiegu niż całej doby (uwzględniono to w stosowanych w pracy oznaczeniach: $T_p do$ – dla średniej dobowej temperatury powietrza, $T_g dz$ – średniej dziennej temperatury gleby).

Odnośnie materiału obserwacyjnego należy jeszcze dodać, że wszystkie rozpatrywane dane – pomimo niewielkiej liczebności – cechuje znaczna rozpię-

tość wartości. Przedziały wartości temperatury powietrza i gleby można zaobserwować na wykresach (Rys. 1), natomiast rozpiętość wartości właściwości gleby była następująca: wilgotności od 0,117 do 0,303 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, objętościowej pojemności cieplnej od 1,37 do 2,29 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$, przewodnictwa cieplnego od 0,71 do 1,82 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, współczynnika przewodnictwa temperaturowego od 5,21 do 9,48 $10^{-7} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, współczynnika przyswajalności cieplnej od 0,99 do 2,04 $10^3 \text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1/2}$.



Rys. 1. Związek między temperaturą powietrza a temperaturą gleby na głębokości $z = 1$ cm rozpatrywany w oparciu o dane dotyczące średnich dobowych wartości temperatury z wybranych dni w okresie maj – lipiec (a) i wszystkich dni tego okresu (b), temperatur minimalnych (c) oraz temperatur maksymalnych powietrza i gleby w wybranych dniach (d).

Fig. 1. Relation between air temperature and soil temperature at depth $z = 1$ cm on the basis of daily mean temperature values from the selected days in May – July period (a) and all the days during the two periods (b), the relation of daily minimum temperatures (c) and maximum temperatures in the selected days (d).

Porównanie zakresu notowanych wartości średnich dobowych temperatury powietrza i gleby (na głębokości 1 cm) jak i charakteru zależności między nimi w przypadku korzystania z ograniczonej (przy 53 parach) oraz poszerzonej (do 204 par) bazy danych wyjściowych umożliwiają wykresy a i b na Rys. 1. Opisujące tę zależność równania, odpowiednio:

$$T_p \text{ do} = 2,071 + 0,691 T_g \text{ dz} \quad (r = 0,940) \quad (1)$$

oraz

$$T_p \text{ do} = 0,741 + 0,787 T_g \text{ dz} \quad (r = 0,928) \quad (2)$$

mają – jak można było oczekiwać – różne wartości współczynników a i b , a współczynnik korelacji (r) okazał się mniejszy w przypadku uwzględniania większej liczby danych. Przykład ten pokazuje, iż prezentowanych w pracy wyników nie należy traktować tak jak otrzymywanych w typowych, opartych na wieloletnich danych, opracowaniach agroklimatycznych. Jednakże wystarczająco dobrze oddają one charakter i siłę rozpatrywanych zależności, co pozwala sądzić, że zestaw materiałów obserwacyjnych jest dostateczny dla przeprowadzenia zamierzonych badań porównawczych.

Przedstawione na kolejnych wykresach (Rys. 1c, d) zależności między minimalnymi i maksymalnymi w ciągu doby temperaturami powietrza i gleby opisywały równania:

$$T_p \text{ min} = 0,776 + 0,843 T_g \text{ min} \quad (r = 0,906) \quad (3)$$

$$T_p \text{ max} = 4,186 + 0,653 T_g \text{ max} \quad (r = 0,916) \quad (4)$$

Godna odnotowania jest mniejsza korelacja między wartościami ekstremów dobowych temperatury niż między wartościami średnimi temperatury powietrza i gleby, co stwierdzono zarówno przy rozpatrywaniu danych temperatury gleby z poziomu 1 jak i 5 cm.

Zasadnicza część wyników przeprowadzonych analiz zawarta jest w Tabeli 1, w której podano równania regresji liniowej dla związku średniej oraz minimalnej i maksymalnej w ciągu dnia temperatury w przypowierzchniowej warstwie gleby (na głębokości 1 i 5 cm) z odpowiednimi wartościami temperatury powietrza (tj. równania jednej zmiennej), jak i finalne równania otrzymane stosując metodę regresji krokowej (przy poziomie ufności 95%), gdzie oprócz temperatury powietrza predyktorami były wilgotność i właściwości cieplne gleby (wartości średnie dla warstwy 0 - 5 cm). Dla każdego z tych modeli poziom istotności (p) jest mniejszy niż 0,001, natomiast o poziomie istotności zmiennych niezależnych innych niż temperatura powietrza (dla której – z oczywistych względów – p jest mniejsze od 0,001) informują odpowiednie oznaczenia.

Tabela 1. Równania regresji otrzymane dla związku temperatury gleby (średniej dziennej, $T_g dz$, minimalnej, $T_g min$, i maksymalnej, $T_g max$) na głębokości $z = 1$ i 5 cm z temperaturą powietrza (odpowiednio – średnią dobową, $T_p do$, minimalną, $T_p min$, i maksymalną, $T_p max$) w przypadku pomijania i uwzględniania przy tym właściwości fizycznych gleby.

Table 1. Single and multiple regression equations of daily mean and extremal temperatures of soil ($T_g dz$, $T_g min$ and $T_g max$) at depth $z = 1$ and 5 cm with mean and extremal air temperatures ($T_p do$, $T_p min$, $T_p max$) and the complex of the following soil physical properties: W – water content in volume unit of soil ($10^2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), C_v – volumetric heat capacity ($10^7 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$), λ – thermal conductivity ($10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), k – thermal diffusivity ($10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), b_c – coefficient of heat admittance of soil ($10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1/2}$). Note: signs ***, ** and * inform that significance level (p) at given variable is smaller than 0.001, 0.01 and 0.05, respectively.

| Zmienna zależna (y) | Równania regresji | R ² (%) |
|---------------------|--|--------------------|
| $T_g dz_{z=1}$ | $y = -0,202 + 1,278 T_p do$ | 88,4 |
| | $y = 5,698 + 1,104 T_p do - 0,163 W^{***}$ | 89,9 |
| $T_g dz_{z=5}$ | $y = -0,242 + 1,212 T_p do$ | 89,3 |
| | $y = 6,952 + 1,000 T_p do - 0,199 W^{****}$ | 91,9 |
| $T_g min_{z=1}$ | $y = 1,215 + 0,973 T_p min$ | 82,1 |
| | $y = -2,116 + 0,706 T_p min - 0,644 W^{****} + 0,999 C_v^{**}$ | 90,0 |
| $T_g min_{z=5}$ | $y = 2,350 + 0,992 T_p min$ | 77,9 |
| | $y = 1,716 + 0,640 T_p min - 0,706 W^{****} + 0,960 C_v^{**}$ | 90,0 |
| $T_g max_{z=1}$ | $y = -0,895 + 1,284 T_p max$ | 83,9 |
| | $y = 7,555 + 1,175 T_p max - 0,425 \lambda^{**}$ | 86,2 |
| $T_g max_{z=5}$ | $y = -1,660 + 1,174 T_p max$ | 86,2 |
| | $y = 6,199 + 0,997 T_p max - 0,210 W^{**}$ | 88,5 |

Objaśnienia: W – zawartość wody w jednostce objętości gleby ($10^2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), C_v – objętościowa pojemność cieplna gleby ($10^7 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$), λ – przewodnictwo cieplne gleby ($10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), k – współczynnik przewodnictwa temperaturowego gleby ($10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), b_c – współczynnik przyswajalności cieplnej gleby ($10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1/2}$); symbol *** oznacza istotność $p < 0,001$, ** $p < 0,01$, * $p < 0,05$.

Tabela 2. Równania regresji otrzymane dla związku średnich i ekstremalnych w ciągu dnia wartości temperatury gleby ($T_g dz$, $T_g min$ i $T_g max$) na głębokości $z = 1$ i 5 cm z wartościami średnimi i ekstremalnymi temperatury powietrza ($T_p do$, $T_p min$ i $T_p max$) oraz poszczególnymi właściwościami cieplnymi gleby.

Table 2. Multiple regression equations of daily mean and extremes of soil temperature ($T_g dz$, $T_g min$, $T_g max$) at depth $z = 1$ and 5 cm with the corresponding values of air temperature ($T_p do$, $T_p min$, $T_p max$) and several thermal properties of soil. Explanations: see Table 1.

| Zmienna zależna (y) | Równania regresji | R ² (%) |
|---------------------|--|--------------------|
| $T_g dz$ $z=1$ | $y = 8,404 + 1,131 T_p do - 0,344 C_v^*$ | 89,8 |
| | $y = 4,397 + 1,200 T_p do - 0,233 \lambda^*$ | 89,4 |
| | $y = 2,957 + 1,275 T_p do - 0,398 k$ | 88,7 |
| | $y = 6,043 + 1,171 T_p do - 0,281 b_c^*$ | 89,6 |
| $T_g dz$ $z=5$ | $y = 9,661 + 1,043 T_p do - 0,396 C_v^{**}$ | 91,3 |
| | $y = 4,073 + 1,138 T_p do - 0,219 \lambda^*$ | 90,3 |
| | $y = 0,996 + 1,211 T_p do - 0,156 k$ | 89,3 |
| | $y = 6,171 + 1,102 T_p do - 0,288 b_c^{**}$ | 90,7 |
| $T_g min$ $z=1$ | $y = 10,572 + 0,789 T_p min - 0,418 C_v^{***}$ | 86,6 |
| | $y = 4,457 + 0,912 T_p min - 0,185 \lambda^*$ | 83,5 |
| | $y = 0,001 + 0,973 T_p min + 0,157 k$ | 82,2 |
| | $y = 6,639 + 0,868 T_p min - 0,274 b_c^{**}$ | 84,6 |
| $T_g min$ $z=5$ | $y = 15,622 + 0,730 T_p min - 0,593 C_v^{***}$ | 86,3 |
| | $y = 7,557 + 0,893 T_p min - 0,298 \lambda^{**}$ | 81,2 |
| | $y = 2,647 + 0,992 T_p min - 0,038 k$ | 77,9 |
| | $y = 10,483 + 0,834 T_p min - 0,411 b_c^{***}$ | 83,1 |
| $T_g max$ $z=1$ | $y = 10,618 + 1,133 T_p max - 0,453 C_v^*$ | 85,6 |
| | $y = 7,555 + 1,175 T_p max - 0,425 \lambda^{**}$ | 86,2 |
| | $y = 8,335 + 1,281 T_p max - 1,171 k^{**}$ | 85,9 |
| | $y = 9,287 + 1,151 T_p max - 0,453 b_c^{**}$ | 86,1 |
| $T_g max$ $z=5$ | $y = 9,978 + 1,021 T_p max - 0,458 C_v^{**}$ | 88,4 |
| | $y = 4,921 + 1,089 T_p max - 0,331 \lambda^{**}$ | 88,0 |
| | $y = 2,971 + 1,172 T_p max - 0,587 k$ | 86,9 |
| | $y = 7,048 + 1,061 T_p max - 0,387 b_c^{**}$ | 88,2 |

Objaśnienia: jak przy Tabeli 1.

Porównanie wartości współczynników determinacji (R^2) odnoszących się do poszczególnych równań pozwala stwierdzić, że ich wzrost w wyniku uwzględnienia właściwości fizycznych gleby był nieduży (tylko o 1,5 - 2,5%) w przypadku zależności między wartościami średnimi temperatur oraz temperaturami maksymalnymi, ale już znaczący dla zależności temperatur minimalnych gleby i powietrza – o 8 i 12%, odpowiednio, rozpatrując poziom $z = 1$ i 5 cm. Jednocześnie okazało się, że czynnikiem istotnie wpływającym na kształtowanie się zależności między temperaturą gleby i powietrza jest przede wszystkim wilgotność gleby, a ponadto – objętościowa pojemność cieplna gleby (w przypadku temperatury minimalnej) i współczynnik przewodnictwa cieplnego (temperatura maksymalna gleby na $z = 1$). Należy zaznaczyć, że dla tych ostatnich zależności, niewiele niższe od uzyskanych metodą regresji krokowej wartości współczynnika determinacji otrzymano przy założeniu, iż dodatkowym predyktorem jest jedynie wilgotność gleby:

$$T_{g,min} \text{ } z=1 = 7,641 + 0,735 T_{p,min} - 0,218 W^{***} \quad (R^2 = 88,4 \%) \quad (5)$$

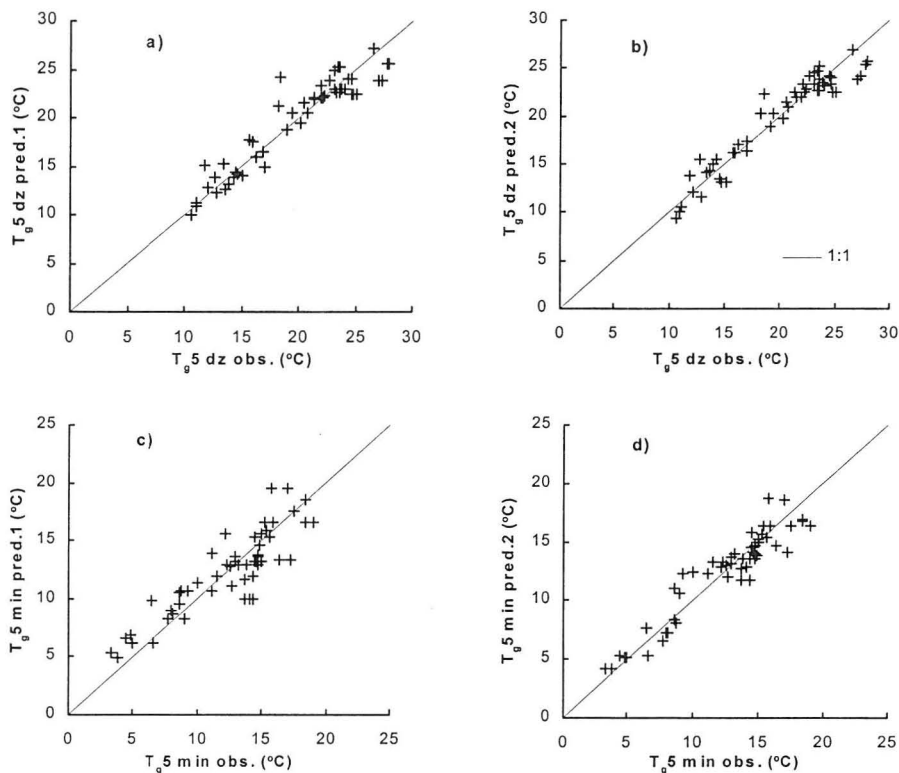
$$T_{g,min} \text{ } z=5 = 11,093 + 0,667 T_{p,min} - 0,296 W^{***} \quad (R^2 = 88,7 \%) \quad (6)$$

$$T_{g,max} \text{ } z=1 = 5,874 + 1,131 T_{p,max} - 1,181 W^* \quad (R^2 = 85,3 \%) \quad (7)$$

Dodatkowo, w celu zbadania znaczenia jakie może mieć uwzględnianie wyłącznie właściwości cieplnych gleby przy określaniu związku między temperaturą w przypowierzchniowej warstwie gleby i temperaturą powietrza, wyznaczone zostały równania regresji wielokrotnej z dwoma tylko zmiennymi niezależnymi: temperaturą powietrza i jedną z właściwości cieplnych (Tab. 2). Przy takim podejściu do zagadnienia okazało się, że: 1) – istotnym statystycznie predyktorem wszystkich rozpatrywanych zależności między temperaturą gleby i powietrza jest C_v , λ i b_c , natomiast k tylko w przypadku temperatury maksymalnej gleby na $z = 5$ cm; 2) – wartości R^2 były wyraźniej zróżnicowane tylko w przypadku równań dotyczących temperatury minimalnej, przy czym z reguły były one największe dla równań z objętościową pojemnością cieplną (za wyjątkiem $T_{g,max}$ na $z = 1$ cm); 3) – generalnie – wartości R^2 dla równań uwzględniających właściwości cieplne były niższe niż dla równań uwzględniających wilgotność gleby (z jednym tylko wyjątkiem – $T_{g,max}$ na $z = 1$ cm).

To ogólne spostrzeżenie, że przy określaniu związku między temperaturą gleby a temperaturą powietrza wilgotność gleby okazała się czynnikiem podobnie lub bardziej znaczącym niż cieplne właściwości gleby, nie jest łatwe do zinterpretowania (należy tu brać pod uwagę zarówno specyfikę zachodzących w warstwie

granicznej z atmosferą zjawisk i procesów, jak i zależności właściwości cieplnych gleby od jej wilgotności), ale za to nader istotne. Sugeruje bowiem możliwość wystarczająco dokładnego szacowania wartości temperatury gleby na podstawie danych o temperaturze powietrza i wilgotności gleby w warstwie przypowierzchniowej, a zatem w oparciu o stosunkowo łatwo dostępne materiały. Z tego też względu, dalsze analizy jakie przeprowadzono dotyczyły tylko związku temperatury gleby i powietrza przy uwzględnieniu wilgotności gleby.



Rys. 2. Porównanie zgodności wartości temperatury gleby na głębokości 5 cm (średnich dziennych i minimalnych) uzyskanych w pomiarach (T_g obs) z obliczonymi (T_g pred) według równań zależności jedynie od temperatury powietrza (wykresy z lewej) oraz równań zależności od dwóch czynników – temperatury powietrza i wilgotności gleby łącznie (wykresy z prawej).

Fig. 2. Comparison of agreement of soil temperatures measured at depth $z = 5$ cm (mean and minimum values) with those calculated with regression equations of one – air temperature variable (graphs on the left) and two variables, i.e. air temperature and soil water content (graphs on the right).

Przykładem ilustrującym wyniki szacowania temperatury gleby na podstawie uzyskanych równań zależności tylko od temperatury powietrza ($T_g \text{ pred.1}$) oraz równań zależności od temperatury powietrza i wilgotności gleby ($T_g \text{ pred.2}$), są wykresy przedstawione na Rys. 2. Widoczna jest poprawa zgodności danych pochodzących z pomiarów z wyliczonymi w oparciu o te drugie równania (dwóch zmiennych), zwłaszcza w przypadku temperatur minimalnych (Rys. 2c i d).

Szczegółową analizę poprawności szacowania temperatury gleby w oparciu o te dwa rodzaje równań, tj. $T_g = f(T_p)$ i $T_g = f(T_p, W)$, umożliwiają dane zawarte w Tabeli 3. Wynika z nich, że w rezultacie rozpatrywania wilgotności gleby jako drugiego obok temperatury powietrza predyktora temperatury gleby, średni błąd kwadratowy otrzymanych wartości temperatury zmalał w przypadku wszystkich równań (najbardziej w odnoszących się do temperatury minimalnej, a przy tym bardziej dla równań dotyczących głębokości 5 niż 1 cm), podobnie jak maksymalny

Tabela 3. Ocena błędu szacowania wartości średnich i ekstremalnych temperatury gleby na głębokości $z = 1$ i 5 cm w oparciu o równania zależności od temperatury powietrza, $T_g = f(T_p)$, oraz od temperatury powietrza i wilgotności gleby, $T_g = f(T_p, W)$

Table 3. Comparison of the estimation errors of the daily mean and extremal values of soil temperature at $z = 1$ and 5 cm depth (mean and maximum percentage error and root mean square error) obtained at application of the simple regression equations, $T_g = f(T_p)$, and multiple regression equations, $T_g = f(T_p, W)$.

| Zależność | Błąd względny (%) | | Śr. błąd kw. (°C) |
|----------------------------------|-------------------|---------|-------------------|
| | średni | maksym. | |
| $T_g dz_{z=1} = f(T_p, do)$ | 6,81 | 30,0 | 1,83 |
| $T_g dz_{z=1} = f(T_p, do, W)$ | 6,98 | 24,9 | 1,70 |
| $T_g dz_{z=5} = f(T_p, do)$ | 6,40 | 31,7 | 1,65 |
| $T_g dz_{z=5} = f(T_p, do, W)$ | 6,08 | 21,8 | 1,44 |
| $T_g min_{z=1} = f(T_p, min)$ | 14,52 | 79,6 | 1,62 |
| $T_g min_{z=1} = f(T_p, min, W)$ | 11,00 | 42,6 | 1,30 |
| $T_g min_{z=5} = f(T_p, min)$ | 14,67 | 61,5 | 1,88 |
| $T_g min_{z=5} = f(T_p, min, W)$ | 9,60 | 30,9 | 1,34 |
| $T_g max_{z=1} = f(T_p, max)$ | 8,11 | 35,8 | 2,68 |
| $T_g max_{z=1} = f(T_p, max, W)$ | 8,39 | 29,3 | 2,56 |
| $T_g max_{z=5} = f(T_p, max)$ | 7,46 | 35,7 | 2,24 |
| $T_g max_{z=5} = f(T_p, max, W)$ | 7,58 | 27,3 | 2,04 |

błąd względny, który zmaliał również we wszystkich przypadkach, choć najbardziej – aż o ponad 30% w przypadku temperatury minimalnej, podczas gdy dla temperatury średniej dziennej i maksymalnej tylko o 5-10%. Jednakże, pomimo znaczącego zmniejszenia różnic między wartościami temperatur notowanych w pomiarach i obliczonych według rozpatrywanych równań, i tak należy liczyć się z tym, że w pewnych (skrajnych) przypadkach różnice temperatury minimalnej mogą sięgać 3°C, temperatury średniej dziennej - 4°C, a temperatury maksymalnej aż 6-7°C.

PODSUMOWANIE

Przedstawione w niniejszej pracy wyniki dotyczą wpływu właściwości fizycznych gleby na kształtowanie się zależności między temperaturą przypowierzchniowej warstwy gleby a temperaturą powietrza. Rozpatrywanie tego związku oddzielnie dla wartości temperatur średnich dobowych, minimalnych i maksymalnych w ciągu dnia i na dwóch głębokościach (1 i 5 cm pod powierzchnią gleby) pozwoliło stwierdzić, iż wpływ ten zaznaczał się w niejednakowym stopniu tak odnośnie temperatur jak i głębokości (najwyraźniej w przypadku temperatury minimalnej, w większym stopniu dla głębokości 5 niż 1 cm).

Spośród kompleksu właściwości cieplnych gleby rozpatrywanych jako czynnik wpływający na relację temperatura gleby – temperatura powietrza, najbardziej znaczące okazały się objętościowa pojemność cieplna, współczynnik przewodnictwa cieplnego oraz współczynnik przyswajalności cieplnej gleby. Stwierdzono jednak, iż czynnikiem w podobnym jak właściwości cieplne gleby stopniu oddziaływującym na kształtowanie się zależności między temperaturą powierzchniowej warstwy gleby a temperaturą powietrza jest wilgotność gleby.

Generalnie rzecz biorąc, uwzględnianie właściwości fizycznych gleby (lub tylko jej wilgotności) przy określaniu związku między temperaturą gleby a temperaturą powietrza należy uznać za wskazane, gdyż prowadzi do jego uściślenia. Stosowanie takiego podejścia sprawia, iż uzyskiwane przy szacowaniu temperatury gleby wyniki są obarczone mniejszym błędem niż z równań zależności jedynie od temperatury powietrza. Tym samym, zaprezentowane w niniejszej pracy podejście może stanowić wskazówkę (uzasadnienie) odnośnie sposobu postępowania w podejmowanych badaniach, jak i przy uzupełnianiu lub poszerzaniu ciągu już istniejących danych obserwacyjnych. Jednocześnie, przedstawione wyniki (w postaci równań regresji) mogą być praktycznie wykorzystane do szacowania średnich oraz ekstremalnych w ciągu doby wartości temperatury gleby podczas okresu wiosenno – letniego na polach uprawnych z glebą lessową i lessopodobną w regionie Lublina.

PIŚMIENICTWO

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. *Minnesota Agr. Exp. Sta. Tech. Bull.*, 306, 1977.
2. **Baranowski R., Bakowski B.:** Wpływ zróżnicowanego składu fazowego gleby na dynamikę jej temperatury. *Roczn. Glebozn.*, 28, 1, 37-44, 1977.
3. **Bednarek A.:** O wpływie temperatury powietrza na kształtowanie temperatury gleby w warunkach ograniczonego dopływu energii promieniowania słońca. *Przeł. Geofiz.*, 11(19), 4, 251-260, 1966.
4. **Czirkow J.I.:** Opredelenie progrewanija poczw po temperature wozduha w period posewa i prorastanija kukuruzy. (w j. ros.) *Meteor. i Gidroł.*, 6, 32-34, 1956.
5. **Ghuman B.S., Lal R.:** Temperature regime of a tropical soil in relation to surface condition and air temperature and its Fourier analysis. *Soil Sci.*, 134, 2, 133-140, 1982.
6. **Gupta S.C., Larson W.E., Linden D.R.:** Tillage and surface residue effects on soil upper boundary temperatures. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47, 1212-1218, 1983.
7. **Gupta S.C., Radke J.K., Larson W.E.:** Predicting temperatures of bare and residue covered soils with and without a corn crop. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45, 405-412, 1981.
8. **Gusewa L.N.:** K woprosu ob opredelenii temperatury powerhnosti poczwy po temperature wozduha. (w j. ros.) *Trudy GGO*, 196, 71-89, 1966.
9. **Hohendorf E.:** Zależność temperatury powierzchniowych warstw kilku typowych gleb od temperatury powietrza. *Wiadom. IMUZ*, 11, 4, 11-28, 1974.
10. **Horton R., Wierenga P.J.:** Determination of the mean soil temperature for evaluation of heat flux in soil. *Agric. Meteorol.*, 28, 309-319, 1983.
11. **Kapuściński J.:** Wymiana ciepła i wilgoci pomiędzy atmosferą i glebą. *Praca dokt., Wydz. Melior. Wod. AR w Poznaniu*, 1982.
12. **Karpińska Z.:** Wpływ opadu naturalnego i nawodnień deszczownianych na termikę gleby w zróżnicowanych warunkach pogodowych. *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, Melioracja XXVIII*, 155, 177-193, 1985.
13. **Kemp P.R., Cornelius J.M., Reynolds J.F.:** A simple model for predicting soil temperatures in desert ecosystems. *Soil Sci.*, 153, 4, 280-287, 1992.
14. **Kossowski J.:** A multisensor thermoelectrical probe for remote measurements of soil profile temperature. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 346, 65-69, 1987.
15. **Kossowski J.:** Differentiation of temperature in arable layer under the influence of soil compaction. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 396, 75-80, 1991.
16. **Koźmiński C.:** Kształtowanie się temperatury gleby na głębokości 5 cm na stacji agrometeorologicznej w Lipkach k/Stargardu w zależności od czynników meteorologicznych. *Zesz. Nauk. AR w Szczecinie, Rolnictwo XXX*, 99, 81-92, 1983.
17. **Krasnjanskaja W.P.:** Swjaz temperatury wozduha s temperaturoj poczwy na glubinach 5 i 10 sm i jej prakticeskoje primenenije. (w j. ros.) *Trudy DW NIGMI*, 12, 106-110, 1961.

18. **Manrique L.A.:** Effects of rainfall and cover on soil temperatures of an isohyperthermic temperature regime, Panama. *Geoderma*, 42, 129-146, 1988.
19. **Olejnik J.:** Modelowe badania struktury bilansu cieplnego i wodnego zlewni w obecnych i przyszłych warunkach klimatycznych. *Roczn. AR w Poznaniu*, z. 268, Poznań 1996.
20. **Panecka K.:** Próba sporządzenia mapy rozkładu geograficznego temperatury gleby w Polsce. *Przeł. Geofiz.*, 15(23), 3, 267-275, 1970.
21. **Pilip E., Sałaciak A.:** Wpływ temperatury powietrza na temperaturę gleby na różnych głębokościach. *Nowe Rolnictwo*, R.20, 19, 6-8, 1971.
22. **Pręgowski P., Świdzki W., Walczak R.T., Usowicz B.:** Role of time and space variability of moisture and density of sand for thermal detection of buried object – modeling and experiments. *Proc. SPIE Thermosense XXI*, 3700, 444-455, 1999.
23. **Toy T.J., Kuhaida A.J., Munson B.E.:** The prediction of mean monthly soil temperature from mean monthly air temperature. *Soil Sci.*, 126, 3, 181-189, 1978.
24. **Usowicz B.:** Statistical-physical model of thermal conductivity in soil. *Pol. J. Soil Sci.*, XXV, 27-34, 1992.
25. **Usowicz B.:** Soil thermal properties software 2.0. Copyright Institute of Agrophysics PAS, Lublin, Poland, 1998.
26. **Vries de D.A.:** Thermal properties of soils. 210-235 w: Van Wijk W.R. (red.) – *Physics of plant environment*. North-Holland Publ., Amsterdam 1963.
27. **Walczak R., Usowicz B.:** Variability of moisture, temperature and thermal properties in bare soil and in crop field. *Int. Agroph.*, 8, 161-168, 1994.
28. **Watson C.L.:** Seasonal soil temperature regimes in South-eastern Australia. *Aust. J. Soil Res.*, 18, 325-331, 1980.
29. **Wijk van W.R., Vries de D.A.:** Periodic temperature variations in a homogenous soil. 102-143 w: van Wijk W.R. (red.) – *Physics of plant environment*. North-Holland Publ., Amsterdam, 1963.

RELATION OF TOPSOIL TEMPERATURE WITH AIR TEMPERATURE AND SOIL PHYSICAL PROPERTIES DATA

J. Kossowski

Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27
e-mail: jkoss@demeter.ipan.lublin.pl

Summary. In the paper there was analysed the effect of soil moisture and several soil thermal properties on form and strength of relationship between temperature of bare soil (at depth 1 and 5 cm) and air temperature (at 2 m height). The regression equations separately for a daily mean, minimal and maximal values of the temperature were determined without and with regard to soil physical properties. The values of determination coefficients of both types of the regression were compared, as well as the agreement between measured and calculated values of soil temperature. It was stated that regarding soil properties in the soil and air temperature relations more precise relationships were obtained and as a consequence, estimated from these regression equations data of soil temperature were burdened with smaller errors.

Key words: soil temperature, air temperature, soil thermal properties, water content.