

¹Instytut Agrofizyki PAN, ul. Doświadczalna 4, 20–290 Lublin
²Katedra Agrometeorologii Akademii Rolniczej w Lublinie, Poland

Jan Kossowski¹, Józef Kołodziej²

*Szacowanie średnich dobowych wartości temperatury
w warstwie ornej gleby na podstawie temperatury powietrza
i wilgotności gleby*

Estimation of daily mean values of soil temperature within the arable layer
on the basis of air temperature and soil moisture

ABSTRACT. The relationship between soil and air temperature proved to be so significant that it can be used for the estimation of soil temperature on the basis of air temperature data. However, the soil – air temperature relations are affected by the season of the year, the type of ecosystem, as well as the type of weather and physical status of soil. The paper analyzed the effect of soil moisture on the strength of the relationship between the temperature of bare soil (at five depths from 1 to 20 cm) and air temperature (at 2 m height). On the basis of the data concerning the days without precipitation in some May – July periods, the regression equations for daily mean values of soil temperature with and without regard to the soil moisture data were determined. Two kinds of soil moisture data were examined: weight moisture in the top (0–5 cm) layer of soil and the volumetric water content in the layer above a given level of the the soil temperature measurement. It was stated that including soil moisture data more precise relationships were obtained (the determination coefficients of multiple regression equations increased by 4% at 1 cm depth to 10% at 20 cm in comparison to simple soil – air temperature relationships), and as a result the data of the soil temperature estimated from these regression equations were burdened with smaller errors. Moreover, similar accuracy of the estimated soil temperature values was noted when both kinds of soil moisture were used. It suggested that the weight moisture in only the top layer of soil can be successfully applied for the estimation of daily mean soil temperature within the whole arable layer on the basis of air temperature and soil moisture data. Thus, the results presented in the paper, although the materials were limited to the days without precipitation, show a methodical approach to complementation or extension of the observational data series.

KEY WORDS: soil temperature, air temperature, soil water content

Badania relacji między temperaturą gleby a temperaturą powietrza, w tym zmierzające do znalezienia modeli matematycznych ją opisujących, mają – oprócz poznawczego – także aspekt praktyczny. Określenie związku między wartościami średnimi dobowymi, miesięcznymi czy rocznymi tych temperatur stwarza bowiem możliwość szacowania temperatury gleby na podstawie standardowych danych o temperaturze powietrza. Taką metodę pozyskiwania danych dla stacji lub terenów, gdzie temperatura gleby nie była mierzona, stosowano niejednokrotnie zarówno w Polsce jak i w innych krajach [Dimo 1967; Panecka 1970; Toy i in. 1978; Watson 1980; Olejnik 1996; Paszczyk 1998].

Na kształtowanie się stosunków termicznych gleby znaczący wpływ wywierają czynniki środowiskowe (typ i stan fizyczny gleby, brak lub obecność pokrywy roślinnej, jej rodzaj i zmiany w czasie). Zatem w badaniach zależności między temperaturą gleby (T_g) a temperaturą powietrza (T_p), prowadzonych pod kątem oszacowania zróżnicowania przestrzennego temperatury gleby, a dotyczących zwłaszcza terenów użytkowanych rolniczo – na czynniki te powinno się zwracać szczególną uwagę. Dla przykładu, zmieniające się wartości parametrów liczbowych równań regresji liniowej $T_g = f(T_p)$ w kolejnych fazach rozwojowych jęczmienia otrzymali Koźmiński i Michalska [1991], ale można też traktować szatę roślinną (np. jej biomase) jako dodatkowy predyktor temperatury gleby [Parton 1984]. Na różnice parametrów liczbowych równań regresji, związane z rodzajem gleby, wskazywali między innymi Czirkow [1956], Krasnjanskaja [1961], Hohendorf [1974]; próbowano także wyznaczać równania uogólnione dla określonych typów gleb [Kapuściński, Wójcicki 1989]. Do zwiększenia dokładności szacowania temperatury gleby na podstawie danych o temperaturze powietrza prowadzić może dodatkowe uwzględnianie stanu fizycznego gleby [Kossowski 2002] i wybranych elementów meteorologicznych [Koźmiński 1983; Parton 1984; Kemp i in. 1992].

Celem niniejszej pracy jest rozpatrzenie związku między średnimi dobowymi wartościami temperatury gleby w obrębie warstwy ornej a wartościami temperatury powietrza na wysokości 2 m, określanego z uwzględnieniem oraz z pominięciem wilgotności gleby, pod kątem dokładności szacowania temperatury gleby na podstawie tych dwóch rodzajów zależności. Stanowi ona dalszy przyczynek metodyczny dotyczący tego zagadnienia, stąd też oparto ją na materiale obserwacyjnym ograniczonym do jednej gleby, pola bez roślin oraz dni bezopadowych.

METODY

Materiał obserwacyjny zebrano w trakcie badań prowadzonych podczas kilku sezonów wegetacyjnych na utrzymywanych w stanie tzw. czarnego ugoru poletkach doświadczalnych w Felinie, usytuowanych tuż obok Obserwatorium Agrometeorologicznego Akademii Rolniczej w Lublinie, skąd pochodziły dane o temperaturze powietrza, mierzone w klatce meteorologicznej na wysokości 2 m. Glebę określano jako lessopodobną (*orthic luvisol*), pylastą, a dokładną jej charakterystykę przedstawiono w innych pracach [Dobrzański, Zawadzki 1952; Usowicz i in. 1995]. Pomiarów temperatury gleby prowadzone były w latach 1978 i 1979 na jednym poletku (codziennie, termometrami rtęciowymi na głębokości 1, 5, 10, 15 i 20 cm), natomiast w roku 1987 na trzech, a w 1989, 1992 i 1993 na dwóch poletkach o różnym zagęszczeniu gleby (okresowo, za pomocą wieloczuJNIKOWYCH termometrów termoelektrycznych). Jako materiał wyjściowy do analiz postanowiono wykorzystać dane pochodzące wyłącznie z dni bez opadów atmosferycznych (podstawowe kryterium wyboru), uzyskane zarówno przy praktycznie niezmiennym w sezonie (lata 1978 i 1979), jak i znacznie zróżnicowanym zagęszczeniu gleby. W efekcie podstawę przeprowadzonych analiz stanowiło 71 par danych dotyczących temperatury gleby i powietrza z 60 wybranych dni w okresie maj–lipiec (po 20 dni z każdego miesiąca). Uwzględnienie dodatkowych danych z poletek o różnej gęstości gleby przybliżyło zakres zmienności tej właściwości w materiale wyjściowym do rzeczywiście występującego na polach uprawnych [Usowicz i in. 1995], natomiast ograniczenie się do dni bezopadowych dało rękojmię w miarę stałej, zależnej jedynie od parowania, wartości wilgotności gleby przyjętej dla danego dnia.

Wilgotność gleby na poletkach określana była metodą grawimetryczną systematycznie w godzinach południowych, natomiast gęstość gleby – na początku i końcu sezonu. Umożliwiło to zastosowanie w analizach dwóch miar wilgotności gleby: tzw. wilgotności wagowej, określanej w procentach suchej masy gleby, oraz wilgotności objętościowej, tj. zawartości wody w jednostce objętości gleby. Po wykonaniu szeregu obliczeń i analiz, uwzględniających różne warianty ujęcia wilgotności gleby, zdecydowano się na korzystanie z następujących danych: wilgotności wagowej gleby w warstwie przypowierzchniowej (0–5 cm) i wilgotności objętościowej gleby w warstwach o miąższości odpowiadającej poziomom pomiaru temperatury gleby, tj. 0–5, 0–10, 0–15 i 0–20 cm.

Odnosnie do materiału obserwacyjnego warto dodać, że pomimo niewielkiej liczby danych każdą z rozpatrywanych wielkości cechowała znaczna rozpiętość wartości. Średnia dobową temperatura powietrza zawarta była w przedziale od 8,4 do 22,6 °C, a przykładowo – średnia temperatura gleby na głębokości 5 cm od 10,6 do 27,9 °C, wilgotność gleby w warstwie 0–5 cm od 8 do 22 %, gęstość gleby w tej samej warstwie od 1,21 do 1,55 Mg m⁻³. Należy też zwrócić uwagę

na niejednakowy – choć zgodny z ogólnie przyjętymi wówczas zasadami – sposób obliczania średniej dobowej wartości temperatury: z 4 terminów obserwacyjnych w przypadku temperatury powietrza, a 3 terminów dla gleby. Powoduje to niezupełne przystawanie do siebie danych, jako że tak obliczona średnia temperatura gleby charakteryzuje bardziej dzienny okres jej przebiegu niż całej doby (co uwzględniono w stosowanych w pracy oznaczeniach: T_p do dla średniej dobowej temperatury powietrza, T_g dz dla średniej dziennej temperatury gleby).

Związek temperatury gleby i powietrza opisywano równaniem regresji liniowej typu $y = a + bx$, a temperatury gleby z temperaturą powietrza i wilgotnością gleby równaniem $y = a + bx_1 + cx_2$; gdzie y oznacza temperaturę gleby (T_g dz) na danej głębokości ($z = 1, 5, 10, 15$ lub 20 cm), x oraz x_1 – temperaturę powietrza mierzoną w klatce meteorologicznej (T_{pdo}), x_2 – średnie dla warstwy 0–5 cm wartości wilgotności wagowej gleby (oznaczane symbolem Ww) lub też wilgotności objętościowej gleby (Wv) dla warstwy odpowiedniej do poziomu pomiaru temperatury (0–5, 0–10, 0–15 lub 0–20 cm), a, b, c – współczynniki liczbowe. Następnie oceniana była zgodność (dokładność przybliżenia) wartości temperatury gleby wyliczanych według otrzymanych równań z uzyskanymi w pomiarach, przy zastosowaniu powszechnych znanych miar ilościowych (średni i maksymalny błąd względny, średni błąd kwadratowy).

WYNIKI

Równania regresji otrzymane dla związku średniej dziennej temperatury gleby na poszczególnych głębokościach w obrębie warstwy ornej ze średnią dobową temperaturą powietrza, $T_g = f(T_p)$, oraz temperaturą powietrza i wilgotnością gleby łącznie, $T_g = f(T_p, W)$, zamieszczono w tabeli 1. Dla każdego z tych modeli, jak i poszczególnych zmiennych niezależnych, poziom istotności był mniejszy niż 0,001. Porównując parametry liczbowe równań $T_g = f(T_p)$, można zauważyć, że wartości współczynników kierunkowych (b) zmniejszały się wraz ze wzrostem głębokości, natomiast wyrazu wolnego (a) – wzrastały. Taką prawidłowość, jak również coraz mniejsze wartości współczynników korelacji równań regresji wyznaczonych dla coraz głębiej położonych poziomów, stwierdzali i inni autorzy [Bonham, Fye 1970; Pilip, Sałaciak 1971; Hohendorf 1974; Kapuściński 1991; Krasnjanskaja 1961]. Podobny kierunek zmian wartości współczynników a i b występował w równaniach $T_g = f(T_p, W)$, natomiast wartości współczynników c wraz ze wzrostem głębokości były coraz większe. W tym miejscu warto nadmienić, że pionowy rozkład średnich dziennych wartości temperatury gleby w rozpatrywanych dniach był typowy dla późnej wiosny i lata, z malejącymi wraz z głębokością wartościami, natomiast zawartość wody (Wv) rozpatry-

wana w warstwach o coraz większej miąższości (0–5, 0–10, 0–15, 0–20 cm) – wzrastała. Toteż otrzymane wartości parametrów liczbowych równań wyznaczonych dla kolejnych poziomów można wiązać zarówno z coraz mniejszym zakresem zmian temperatury oraz wilgotności gleby w miarę oddalania się od jej powierzchni, jak i z wartościami zmiennych niezależnych, tj. temperatury i wilgotności w rozkładzie pionowym.

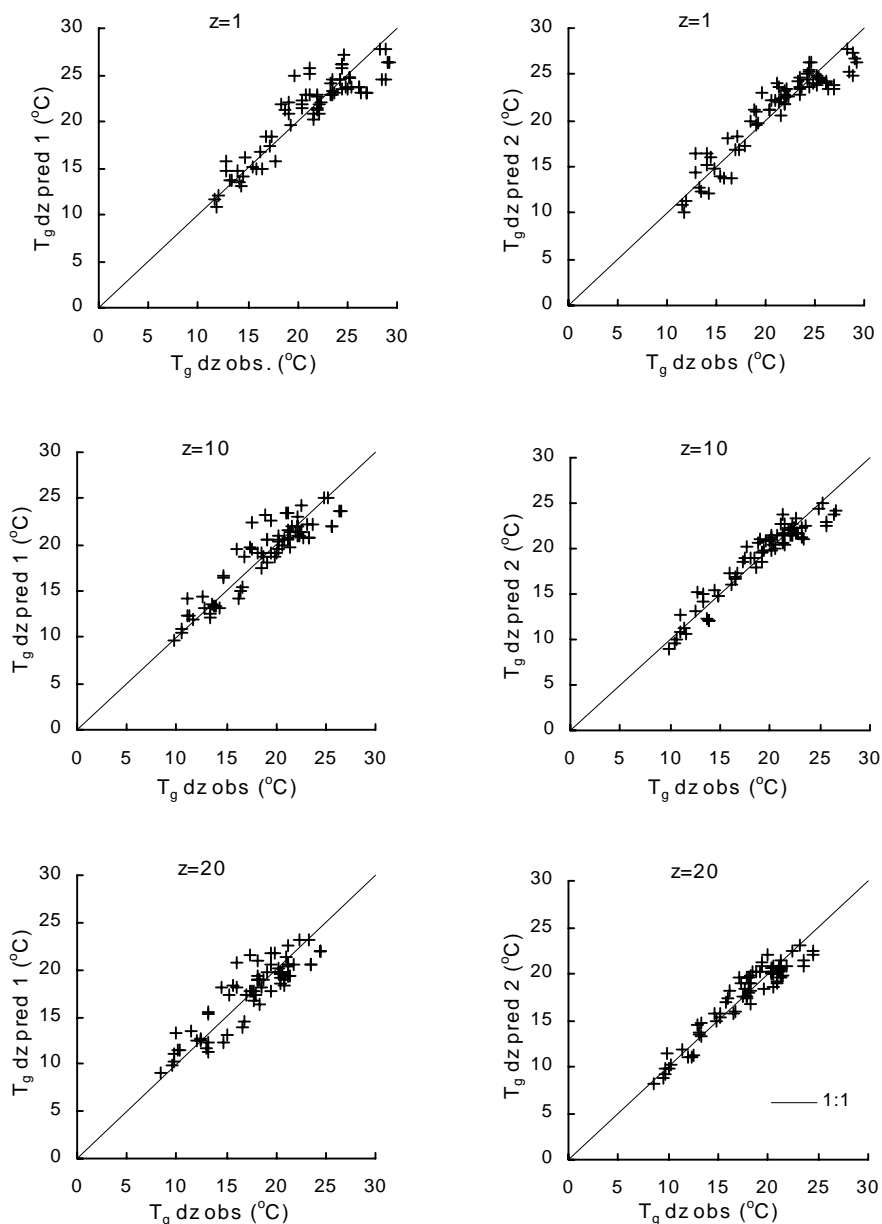
Tabela 1. Równania regresji dla związku średniej dziennej temperatury gleby ($T_{g,dz}$, °C) na głębokościach $z = 1, 5, 10, 15$ i 20 cm ze średnią dobową temperatury powietrza ($T_{p,do}$, °C) oraz z temperaturą powietrza i wilgotnością gleby łącznie (otrzymane na podstawie danych z wybranych dni bezopadowych w miesiącach maj–lipiec)

Table 1. Regression equations of the daily mean temperature of soil ($T_{g,dz}$, °C) at depths of $z = 1, 5, 10, 15$ and 20 cm with daily mean air temperature ($T_{p,do}$, °C) and both, air temperature and soil moisture parameters. The data concern the days without precipitation in selected May–July periods

Równania regresji Regression equations	R ² (%)
$T_{g,dz_{z=1}} = 0,635 + 1,204 T_{p,do}$	83,8
$T_{g,dz_{z=1}} = 8,483 + 0,981 T_{p,do} - 0,221 Wv_5$	88,0
$T_{g,dz_{z=1}} = 8,622 + 0,974 T_{p,do} - 0,310 Ww_5$	88,0
$T_{g,dz_{z=5}} = 0,439 + 1,148 T_{p,do}$	84,7
$T_{g,dz_{z=5}} = 9,166 + 0,901 T_{p,do} - 0,246 Wv_5$	90,3
$T_{g,dz_{z=5}} = 9,481 + 0,888 T_{p,do} - 0,351 Ww_5$	90,6
$T_{g,dz_{z=10}} = 0,637 + 1,077 T_{p,do}$	84,2
$T_{g,dz_{z=10}} = 10,044 + 0,854 T_{p,do} - 0,272 Wv_{10}$	90,9
$T_{g,dz_{z=10}} = 10,083 + 0,806 T_{p,do} - 0,366 Ww_5$	91,5
$T_{g,dz_{z=15}} = 0,754 + 1,025 T_{p,do}$	82,5
$T_{g,dz_{z=15}} = 11,947 + 0,779 T_{p,do} - 0,322 Wv_{15}$	91,3
$T_{g,dz_{z=15}} = 11,009 + 0,731 T_{p,do} - 0,398 Ww_5$	91,8
$T_{g,dz_{z=20}} = 0,789 + 0,989 T_{p,do}$	80,5
$T_{g,dz_{z=20}} = 13,259 + 0,721 T_{p,do} - 0,356 Wv_{20}$	90,8
$T_{g,dz_{z=20}} = 11,462 + 0,682 T_{p,do} - 0,414 Ww_5$	91,1

Objaśnienia: Wv – zawartość wody w jednostce objętości gleby ($10^2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), Ww – wilgotność wagowa gleby (10^2 kg kg^{-1}); indeksy 5, 10, 15, 20 oznaczają warstwę gleby – odpowiednio – 0-5, 0-10, 0-15 i 0-20 cm

Explanations: Wv – volumetric soil water content ($10^2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), Ww – weight moisture of soil (10^2 kg kg^{-1}); figures 5, 10, 15, 20 indicate soil layers 0-5, 0-10, 0-15 and 0-20 cm, respectively.



Rycina 1. Porównanie zgodności średnich dziennych wartości temperatury gleby na głębokościach 1, 10 i 20 cm uzyskanych z pomiarów ($T_g \text{ dz obs}$) z obliczonymi według równań zależności od temperatury powietrza ($T_g \text{ dz pred 1}$) oraz dwóch parametrów – temperatury powietrza i wilgotności wagowej gleby w warstwie przy powierzchniowej ($T_g \text{ dz pred 2}$)

Figure 1. Comparison of agreement of soil temperature measured at depth $z = 1, 10$ and 20 cm ($T_g \text{ dz obs}$) with those calculated using regression equations of one – air temperature variable ($T_g \text{ dz pred 1}$) and two variables, i.e. air temperature and weight moisture in the top layer of soil ($T_g \text{ dz pred 2}$)

Tabela 2. Ocena błędu szacowania średnich dziennych wartości temperatury gleby na głębokościach $z = 1, 5, 10, 15$ i 20 cm według równań zależności od temperatury powietrza $T_g = f(T_p)$ oraz temperatury powietrza i wilgotności gleby $T_g = f(T_p, W)$ przedstawionych w tabeli 1

Table 2. Comparison of the estimation errors of daily mean values of soil temperature at $z = 1, 5, 10, 15$ and 20 cm depth obtained with application of the simple, $T_g = f(T_p)$, and multiple regression equations, $T_g = f(T_p, W)$ presented in Table 1

Zależność Relationship	Średni błąd kwadratowy Mean square error (°C)	Błąd względny (%) Relative error (%)	
		średni mean	maksymalny maximum
$T_g dz_{z=1} = f(T_p do)$	1,93	7,12	26,7
$T_g dz_{z=1} = f(T_p do, Wv_5)$	1,67	6,73	28,1
$T_g dz_{z=1} = f(T_p do, Ww_5)$	1,67	6,73	28,1
$T_g dz_{z=5} = f(T_p do)$	1,78	6,94	28,4
$T_g dz_{z=5} = f(T_p do, Wv_5)$	1,41	5,82	24,0
$T_g dz_{z=5} = f(T_p do, Ww_5)$	1,39	5,85	24,1
$T_g dz_{z=10} = f(T_p do)$	1,70	7,11	28,0
$T_g dz_{z=10} = f(T_p do, Wv_{10})$	1,30	5,64	20,6
$T_g dz_{z=10} = f(T_p do, Ww_5)$	1,25	5,43	19,0
$T_g dz_{z=15} = f(T_p do)$	1,73	7,94	30,2
$T_g dz_{z=15} = f(T_p do, Wv_{15})$	1,21	5,55	16,5
$T_g dz_{z=15} = f(T_p do, Ww_5)$	1,18	5,33	14,1
$T_g dz_{z=20} = f(T_p do)$	1,78	8,78	33,8
$T_g dz_{z=20} = f(T_p do, Wv_{20})$	1,22	5,78	18,5
$T_g dz_{z=20} = f(T_p do, Ww_5)$	1,20	5,60	16,1

Dalsze spostrzeżenia poczynione przy analizie zestawów równań zawartych w tabeli 1 dotyczą wzrostu wartości współczynników determinacji (R^2) równań regresji wielokrotnej $T_g = f(T_p, W)$ w porównaniu z równaniami z jedną zmienną $T_g = f(T_p)$. W przypadku uwzględniania jako dodatkowego predyktora temperatury gleby wilgotności objętościowej gleby (Wv) w warstwach powyżej danego poziomu pomiaru temperatury zanotowany wzrost wartości R^2 dla poszczególnych poziomów wynosił 4,2% ($z = 1$ cm), a dalej – 5,6%, 6,7%, 8,8% i 10,3% (na $z = 20$ cm). Okazało się też, że zbliżony (na 1 cm), a nawet nieco większy (na pozostałych poziomach) wzrost wartości współczynników determinacji otrzymano w przypadku uwzględniania w równaniach wilgotności wagowej gleby (Ww) tylko w warstwie przypowierzchniowej (tj. 0–5 cm). Re-

zultaty te świadczą o znaczącym wpływie wilgotności gleby na kształtowanie się zależności między temperaturą gleby i powietrza, a co za tym idzie o racjonalności jej uwzględnienia przy szacowaniu temperatury gleby. Wynika z nich ponadto sugestia o możliwości wystarczająco dokładnego szacowania wartości temperatury gleby na podstawie danych o temperaturze powietrza i wilgotności wagowej gleby jedynie w warstwie przypowierzchniowej, a zatem przy wykorzystaniu danych o wiele prostszych w pomiarach.

Przykładem ilustrującym wyniki szacowania temperatury gleby na podstawie uzyskanych równań zależności tylko od temperatury powietrza oraz równań zależności od temperatury powietrza i wilgotności gleby łącznie są wykresy przedstawione na rycinie 1. Widoczną poprawę zgodności danych pochodzących z pomiarów z wyliczonymi na podstawie równań uwzględniających wilgotność gleby obserwowano zarówno dla poziomów prezentowanych, jak i innych rozpatrywanych w obrębie warstwy ornej.

Szczegółową analizę dokładności szacowania temperatury gleby, opartego na poszczególnych równaniach, tj. $T_g = f(T_p)$, $T_g = f(T_p, W_v)$ i $T_g = f(T_p, W_w)$, umożliwiają dane zawarte w tabeli 2. Wynika z nich, że średni błąd kwadratowy wartości temperatury gleby otrzymanych z zależności T_g od T_p był największy na $z = 1$ cm (2,0 °C), zmniejszał się wraz ze wzrostem głębokości do $z = 10$ cm (1,7 °C), a następnie wzrastał. Podobny układ zmian wartości średniego błędu kwadratowego z głębokością występował w przypadku wartości temperatury gleby, obliczonych z równań $T_g = f(T_p, W)$, z tym że najmniejszy błąd zanotowano na $z = 15$ cm. Jednocześnie wartości tego błędu były znacznie mniejsze: o 13,5% na $z = 1$ cm, 23,5% na $z = 10$ cm i ponad 31% na $z = 20$ cm przy uwzględnieniu wilgotności objętościowej gleby (W_v), a gdy posłużono się danymi dotyczącymi wilgotności wagowej gleby w warstwie przypowierzchniowej (W_w) – o 13,5%, 26,5% i 32,5%, odpowiednio, na $z = 1$, 10 i 20 cm. Średni błąd względny wartości temperatury gleby, otrzymanych z równań $T_g = f(T_p)$, wynoszący od 6,9% na $z = 5$ cm do 8,8% na $z = 20$ cm, przy korzystaniu z równań $T_g = f(T_p, W)$ zmniejszył się najmniej (o 0,4%) na $z = 1$ cm, ale już o ponad 1% na $z = 5$ cm, a 3% na $z = 20$ cm (nieco więcej przy uwzględnianiu W_w niż W_v). Analiza maksymalnego błędu względnego wyliczanych wartości temperatury gleby wykazuje, że – z wyjątkiem najbliższego powierzchni poziomu 1 cm – w rezultacie uwzględniania wilgotności gleby przy określaniu zależności temperatury gleby od temperatury powietrza notowano jego obniżenie (o 4% na $z = 5$ cm, 7–9% na $z = 10$ cm, a aż o 15–18% na $z = 20$ cm).

Warto dodać, że rozpatrywane w wartościach bezwzględnych największe różnice między temperaturą gleby zanotowaną w pomiarach a wyliczoną według poszczególnych równań wynosiły od 4,7 °C ($z = 20$ cm) do 5,3 °C ($z = 1$ cm) przy

stosowaniu równań $T_g = f(T_p)$, natomiast przy stosowaniu równań $T_g = f(T_p, W)$ – odpowiednio od 3,0 do 4,1 °C w przypadku uwzględniania wilgotności objętościowej gleby (W_v), a od 2,6 do 3,9 °C, gdy posługiwano się danymi dotyczącymi wilgotności wagowej gleby w warstwie przypowierzchniowej (W_w).

WNIOSKI

1. Związek między temperaturą gleby (na różnych głębokościach) a temperaturą powietrza (mierzoną na wysokości 2 m), stwierdzany we wcześniejszych i przedstawionych tu badaniach, może być wykorzystywany do szacowania wartości temperatury gleby, choć należy się przy tym liczyć ze znacznymi błędami (sięgającymi ponad 5 °C w przypadku średniej dobowej temperatury gleby w warstwie ornej na polach bez pokrywy roślinnej podczas miesięcy wiosenno-letnich).

2. Uwzględnianie wilgotności gleby przy wyznaczaniu równań zależności między temperaturą gleby a temperaturą powietrza prowadzi do znaczącego zwiększenia dokładności szacowanych w oparciu o nie wartości temperatury gleby.

3. Zbliżona dokładność szacowanych z równań regresji wielokrotnej $T_g = f(T_p, W)$ wartości temperatury gleby na poszczególnych głębokościach w przypadku stosowania danych dotyczących wilgotności wagowej gleby w warstwie przypowierzchniowej, zamiast wilgotności objętościowej w warstwach powyżej danego poziomu pomiaru temperatury, stanowi wystarczające merytoryczne uzasadnienie do korzystania z tej pierwszej, łatwiejszej do oznaczania (i częściej mierzonej).

4. Prezentowane w niniejszej pracy wyniki (w postaci równań regresji) – z uwagi na ograniczony do dni bezopadowych materiał wyjściowy – traktować należy nie w kategorii typowych opracowań agroklimatycznych, lecz jako ilustrację próby metodycznej dotyczącej sposobu postępowania w tego rodzaju badaniach, zwłaszcza przy uzupełnianiu lub poszerzaniu ciągów już istniejących danych obserwacyjnych.

PIŚMIENNICTWO

- Bonham C.D., Fye R.E. 1970. Estimation of wintertime soil temperatures. *J. Econ. Entomol.* 63, 4, 1051–1053.
- Czirkow J.I. 1956. Opredelenie progrewanija poczwy po temperature wozducha w period posewa i prorastanija kukuruzy. *Meteorol. i Gidrol.* 6, 32–34.
- Dimo W.N. 1967. Temperatura poczw i wozducha poczwonno-bioklimaticzeskich oblastej SSSR. *Poczwowiedienie* 12, 75–91.

- Dobrzański B., Zawadzki S. 1952. Gleby Zakładu Naukowo-Doświadczalnego Felin. *Annales UMCS, Sec. E*, 6, 231–252.
- Hohendorf E. 1974. Zależność temperatury powierzchniowych warstw kilku typowych gleb od temperatury powietrza. *Wiadom. IMUZ*, 11, 4, 11–28.
- Kapuściński J. 1991. Próba określenia warunków termicznych gleby temperaturą powietrza. *Rocz. Gleb.* 42, 1/2, 17–26.
- Kapuściński J., Wójcicki J. 1989. An attempt at plotting a map of soil temperature at a depth of 50 cm for the area of Poland. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 369, 45–50.
- Kemp P.R., Cornelius J.M., Reynolds J.F. 1992. A simple model for predicting soil temperatures in desert ecosystems. *Soil Sci.* 153, 4, 280–287.
- Kossowski J. 2002. Związek temperatury przypowierzchniowej warstwy gleby z temperaturą powietrza i właściwościami fizycznymi gleby. *Acta Agrophysica*, 78, 75–88.
- Koźmiński C. 1983. 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* 30, 99, 81–92.
- Koźmiński C., Michalska B. 1991. Określanie temperatury gleby pod jęczmieniem jarym na podstawie standardowych danych meteorologicznych. *Rocz. Gleb.* 42, 1/2, 5–16.
- Krasnjanskaja W.P. 1961. Swjaz temperatury wozduha s temperaturoj poczwy na głąbinach 5 i 10 sm i jej prakticeskoje primenenije. *Trudy DW NIGMI*, 12, 106–110.
- Olejnik J. 1996. Modelowe badania struktury bilansu cieplnego i wodnego zlewni w obecnych i przyszłych warunkach klimatycznych. *Roczn. AR w Poznaniu, Rozpr. Naukowe*, 268, 1–125.
- Panecka K. 1970. Próba sporządzenia mapy rozkładu geograficznego temperatury gleby w Polsce. *Przeł. Geofiz.* 15, 3, 267–275.
- Parton W.J. 1984. Predicting soil temperatures in a shortgrass steppe. *Soil Sci.* 138, 2, 93–101.
- Paszczyk J. 1998. Próba oceny bilansu promieniowania i wymiany ciepła w zlewni Bystrzycy lubelskiej. 95–100. W: M. Nowosad (red.) – *Problemy współczesnej klimatologii i agrometeorologii regionu lubelskiego*. Wyd. UMCS, Lublin.
- Pilip E., Sałaciak A. 1971. Wpływ temperatury powietrza na temperaturę gleby na różnych głębokościach. *Nowe Rolnictwo*, 19, 6–8.
- Toy T.J., Kuhaida A.J., Munson B.E. 1978. The prediction of mean monthly soil temperature from mean monthly air temperature. *Soil Sci.* 126, 3, 181–189.
- Usovicz B., Baranowski P., Kossowski J. 1995. Spatial distribution of some physical quantities characterizing soil structure state in cultivated fields. *Polish J. Soil Sci.* 28, 1, 19–27.
- Watson C.L. 1980. Seasonal soil temperature regimes in south-eastern Australia. *Aust. J. Soil Res.* 18, 325–331.