

## REKONSTRUKCJA BRAKUJĄCYCH DANYCH TEMPERATURY GRUNTU W POLSKIEJ STACJI POLARNEJ W HORNSUNDZIE (SW SPITSBERGEN) W LATACH 1990-2013

RECONSTRUCTION OF THE MISSING DATA OF THE GROUND TEMPERATURE  
IN THE POLISH POLAR STATION IN HORNSUND (SW SPITSBERGEN)  
IN THE PERIOD OF 1990-2013

Jan Leszkiewicz, Zbigniew Caputa

Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski  
ul. Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec  
jan.leszkiewicz@us.edu.pl, zbigniew.caputa@us.edu.pl

**Zarys treści.** Temperatura gruntu jest ważnym wskaźnikiem stanu wieloletniej zmarzliny oraz warstwy czynnej szczególnie w okresie współczesnego ocieplenia klimatu. Oddziałuje na zjawiska geomorfologiczne, hydrologiczne i inne, które zachodzą głównie w warstwie czynnej, natomiast całkowite zamarznięcie gruntu wyraźnie hamuje ich przebieg. Stąd też duże zainteresowanie danymi temperatury gruntu. Jednak historyczne dane często cechują się brakami pomiarowymi lub krótkimi seriami a nawet błędami. Dlatego dająca pozytywne wyniki, metoda rekonstrukcji danych temperatury gruntu na różnych głębokościach może ułatwić badania nad termiką gruntu. Metoda warunków meteorologicznych poprzedzających (MWMP) pozwala z wysoką wiarygodnością statystyczną odtworzyć brakujące serie danych na podstawie temperatury powietrza lub innych. Użyteczność metody przedstawiono na podstawie brakujących pomiarów temperatury gruntu na Polskiej Stacji Polarnej. Stwierdzono wysoką korelację ( $r > 0,9$ ) oraz istotność statystyczną dla relacji temperatura powietrza poprzedzająca – temperatura gruntu. Długość czasu reakcji (połowa czasu poprzedzającego) wyniosła: 1-4 dni dla przy powierzchniowej temperatury gruntu (głębokości 5, 10 i 20 cm) oraz 8-26,5 dni dla temperatury gruntu z głębokości 100 cm. Analiza długich serii czasowych pozwoliła na określenie tendencji współczesnego ocieplenia gruntu, np. zanik temperatury gruntu  $-10^{\circ}\text{C}$  na głębokości 100 cm od roku 2005.

**Słowa kluczowe:** temperatura gruntu, Spitsbergen, metoda statystyczna, rekonstrukcja brakujących danych.

### 1. Wstęp

Temperatura gruntu jest ważnym wskaźnikiem stanu wieloletniej zmarzliny oraz warstwy czynnej (Tam i in. 2015), tzn. rozmarznionego gruntu, szczególnie w okresie współczesnego ocieplenia klimatu (Hipp i in. 2012, Wijngaarden 2014). Oddziałuje na zjawiska geomorfologiczne (Haasa i in. 2015), hydrologiczne i inne (Burke i in. 2012, MacDougall i in. 2012), które zachodzą głównie w rozmarznionej warstwie czynnej, natomiast całkowite zamarznięcie gruntu skutecznie hamuje ich przebieg. Stąd też duże zainteresowanie temperaturą gruntu nie tylko klimatologów (Bailey i in. 1997, Przybylak 2007), ale również geomorfologów i hydrologów (Dobiński i in. 2011, Etzelmüller i in. 2011, Aalto i in. 2014). Badania temperatury czynnej warstwy zmarzliny na Spitsbergenie obejmowały początkowo nieliczne serie pomiarowe całoroczne (Czepe 1966, Baranowski 1968, Głowicki 1985, Migala 1990, 1991;

Niedźwiedź 1992). Więcej badań wykonywano w okresach letnich (m. in. Grześ 1984, Repelewska-Pękalowa i Magierski 1989, Angiel 1994) oraz podejmowano sporadyczne badania zimowe (Kamiński i Wach 1993).

Temperatura gruntu była mierzona na głębokościach 5, 10, 20 i 50 cm w latach 1978-1986 oraz dodatkowo na głębokościach 80 i 100 cm w latach 1980-1986 (Miętus i Filipiak 2001). Cennym uzupełnieniem tych pomiarów było zastosowanie aparatury automatycznej w okresie 1988-1998 (Caputa i Głowacki 1998, 2002). Od stycznia 2001 pomiary dokonywane są za pomocą automatycznej stacji pomiarowej z zestawem termometrów na głębokościach: 5, 10, 20 i 50 cm (Sikora i in. 2010, <http://hornsund.igf.edu.pl/meteo.html>). Wyniki tych pomiarów znalazły odzwierciedlenie w licznych opracowaniach (m.in. Pereyma 1983, Miętus 1992, Kwaśniewska i Pereyma 2004, Leszkiewicz i Caputa 2004, Migala i in. 2004, Marsz i Styszyńska 2007, Głowacki 2007, Araźny i in. 2010, Dolnicki 2010, Dolnicki i in. 2013) oraz pełne zestawienie i analiza w monografii pod redakcją A. Marsza i A. Styszyńskiej (2013).

Dane pozyskane za pomocą automatycznej stacji są archiwizowane w Zakładzie Badań Polarnych i Morskich Instytutu Geofizyki PAN w Warszawie. Jednak seria czasowa pomiaru temperatury gruntu wykazuje liczne braki (szczególnie w latach 90-tych XX w.). Wyróżnić tu można: braki długie (roczne, wielomiesięczne), np. 1.07.1998-30.06.1999 r. oraz braki krótkie (w całym profilu pomiarowym, lub na niektórych głębokościach). Ponadto, rzadko, zdarzają się dane błędne. Dlatego też rekonstrukcja danych stała się ważnym zadaniem. Podejmowano próby rekonstrukcji danych za pomocą związków statystycznych (m.in. Marsz i in. 2010, Gisnås i in. 2014). Wykonano również próby modelowania temperatury gruntu (m.in. Etzelmüller i in. 2011) z uwzględnieniem topografii (Riseborough i in. 2008, Harris i in. 2009) oraz przestrzennego rozkładu (Gisnås i in. 2013) i zmian czasowych permafrostu (Hipp i in. 2012).

Celem pracy było przetestowanie efektywnej metody rekonstrukcji danych temperatury gruntu na różnych głębokościach, co pozwoliło na uzupełnienie brakujących danych oraz poprawienie błędów. Ponadto określono tendencję współczesnych zmian temperatury gruntu – w tym przypadku przydatne okazały się wykresy termoizoplei gruntu dla wybranych sezonów.

## **2. Metoda warunków meteorologicznych poprzedzających**

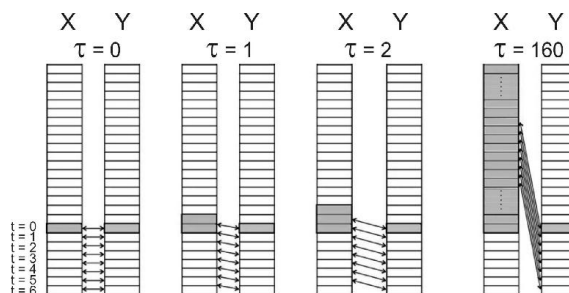
Ponieważ stwierdzono wysoką korelację między temperaturą gruntu a temperaturą powietrza (Marsz i in. 2011), to ten związek statystyczny wykorzystano do uzupełnienia brakujących danych. Zastosowano metodę warunków meteorologicznych poprzedzających – dalej MWMP (Leszkiewicz 1987, Gądek i Leszkiewicz 2007, 2009). Ta metoda statystyczna pozwala określić czas i charakter reakcji dla zjawisk przyrodniczych typu „przyczyna – skutek”. Polega nie na badaniu fizycznej natury zjawisk przyrodniczych, ani mechanizmów zachodzących między przyczyną i skutkiem ale zależności statystycznej, ze szczególnym uwzględnieniem przesunięcia czasowego, między statystyczną przyczyną i statystycznym skutkiem. Dla szeregu czasowego zjawiska uznanego za przyczynę oblicza się narastającą krokowo długość okresu poprzedzającego (nawet do kilku miesięcy), a następnie wartość średniej arytmetycznej przyczyny z każdego okresu poprzedzającego. Rycina 1 wyjaśnia te obliczenia: X i Y są szeregami czasowymi zawierającymi kolejne średnie dobowe statystycznej przyczyny (X) i statystycznego skutku (Y). Narastająca w kolejnych szeregach X liczba szarych prostokątów (dni) obrazuje wzrost długości czasu poprzedzającego  $\tau$ .

Metodę tę zastosowano wielokrotnie do różnych zjawisk w różnych obszarach. Zbadano reakcję odpływu rzeki lodowcowej na temperaturę poprzedzającą i opad poprzedzający na Południowym Spitsbergenie (Leszkiewicz 1987). Na Wyżynie Krakowsko-Częstochowskiej metodę zastosowano do określenia czasu reakcji zwierciadła wód podziemnych Płaskowyżu Ojcowskiego na opad atmosferyczny poprzedzający (Leszkiewicz i in. 1991, Leszkiewicz i in. 1993, Leszkiewicz i Rózkowski 2000). W Tatrach Wysokich do rekonstrukcji temperatury powierzchni gruntu w piętrze alpejskim Tatr w sezonach zimowych 1954-2010 (Gądek i Leszkiewicz 2012).

W niniejszym opracowaniu rekonstrukcji temperatury gruntu zastosowano wzór (równanie 1):

$$X(t, \tau) = \frac{\sum_{\tau=0}^{\tau_{\max}} X_{t-\tau}}{\tau + 1} \quad (1)$$

gdzie:  $X(t, \tau)$  – średnia temperatura powietrza w czasie poprzedzającym ( $\tau = 0, 1, \dots, 160$  dni) przy porządkowana do czasu  $t$  ( $t$  – kolejne dni analizowanych sezonów rocznych);  $X_{t-\tau}$  – temperatura powietrza w czasie  $t-\tau$ .



Ryc. 1. Statystyczna metoda warunków meteorologicznych poprzedzających (MWMP) – sposób obliczania korelacji

Fig. 1. The statistical method of the preceding meteorological conditions (MWMP) – the method for calculating the correlation.

Analizę statystyczną przeprowadzono dla czterech sezonów trzynastomiesięcznych (od 1 czerwca do 30 czerwca roku następnego): 1991/1992, 1997/1998, 2005/2006 i 2012/2013, ponadto dodatkowe analizy wykonano dla sezonów letnich i zimowych w tych okresach. Dla każdego sezonu uzyskano w ten sposób wykresy – korelogramy (ryc. 2). Wartości maksymalne na korelogramach wyznaczały czas poprzedzający, który podzielono przez 2, aby uzyskać czas reakcji temperatury gruntu na warunki meteorologiczne poprzedzające (tzn. poprzedzającą temperaturę powietrza). Czas reakcji to środek przedziału czasowego od zera do maksymalnego czasu poprzedzającego. Obliczenia wykonywane były w programach Excel (z użyciem makropoleceń Visual Basic) i STATISTICA.

Wykresy korelogramów wskazały wysoką ( $r > 0,95$ ) i istotną zależność statystyczną między temperaturą gruntu i poprzedzającą temperaturą powietrza. Korelogramy temperatury gruntu z niedużych głębokości: 5, 10 i 20 cm miały podobny przebieg, niemalże nakładały się na siebie. Charakterystyczną cechą korelogramów z głębokości 100 cm były "rozległe" maksima – współczynnik korelacji osiągał najwyższe wartości w szerokim przedziale czasowym, co wynikało z małej zmienności

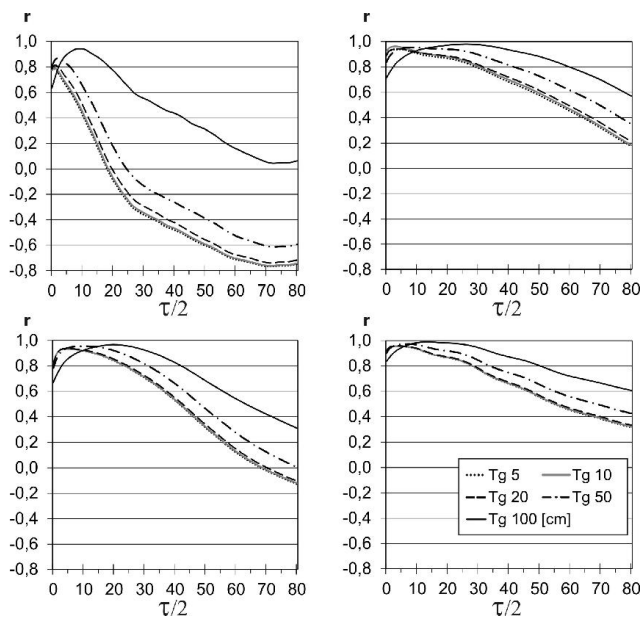
temperatury gruntu na głębokości 100 cm. Czas reakcji wzrastał od 1–4 dni na głębokości 5 cm do 8,0-26,5 dni na głębokości 100 cm (tab. 1).

Tab. 1. Maksymalne wartości współczynników korelacji ( $r_{max}$ ) oraz odpowiadające im czasy reakcji temperatury gruntu na poprzedzającą temperaturę powietrza ( $\tau/2$  [dni]) dla głębokości: 5, 10, 20, 50 i 100 cm

Tab. 1. The maximum values of correlation coefficients ( $r_{max}$ ) and the corresponding times of the response of the ground temperature to the preceding air temperature ( $\tau/2$  [days]) for a depth of: 5, 10, 20, 50 and 100cm.

Głębokość pomiaru [cm] Measuring depth [cm]	$r_{max}$	$\tau/2$ [dni/days]	a	b
5	0,94	4	0,22	1,04
10	0,93	4	0,22	1,04
20	0,94	4	0,11	0,99
50	0,95	6	-0,26	0,86
100	0,97	26	-0,42	0,66

Zastosowanie korelacji wartości jednoczesnych ( $\tau = 0$  dni) w rekonstrukcjach dało mniej dokładne wyniki (ryc. 2). Natomiast uwzględnienie wartości statystycznej przyczyny w czasie poprzedzającym pozwoliło na wysoki przyrost współczynnika korelacji, np. wzrost współczynnika korelacji  $r$  z 0,80 do 0,99 dla temperatury gruntu na głębokości 100 cm w sezonie 2012/2013 dla okresu poprzedzającego  $\tau = 16$  dni.



Ryc. 2. Korelogramy zależności statystycznej temperatury gruntu z głębokości: 5, 10, 20, 50 i 100 cm od poprzedzającej temperatury powietrza, gdzie:  $r$  – współczynnik korelacji,  $\tau$  – czas poprzedzający,  $\tau/2$  – czas reakcji,  $t$  – czas (kolejne dni poszczególnych sezonów)

Fig. 2. Diagram of statistical dependence of the ground temperature at a depth of 5, 10, 20, 50 and 100cm on the preceding air temperature, where:  $r$  – correlation coefficient  $\tau$  – preceding time,  $\tau/2$  – response time,  $t$  – time (consecutive days of each season).

Do uzupełnienia brakujących danych temperatury gruntu posłużyło równanie regresji (równanie 2), które obliczono z uwzględnieniem przesunięcia czasowego dla badanych głębokości gruntu w różnych sezonach. W tabeli 2 przedstawiono przykładowe współczynniki równania regresji (a i b) dla analizowanych głębokości gruntu w sezonie 2005/2006.

$$tg' = a + b \cdot tp_{pop} \quad (2)$$

gdzie:  $tg'$  – obliczona brakująca temperatura gruntu,  $tp_{pop}$  – poprzedzająca temperatura powietrza określona na podstawie czasu reakcji (maksimum korelogramu); a, b – współczynniki równania regresji.

Tab. 2. Współczynniki równania regresji (a i b) dla analizowanych głębokości gruntu w sezonie 2005/2006.

Tab. 2. The coefficients of the regression equation (b) for the analyzed ground depth in the season of 2005/2006.

Głębokość pomiaru [cm] Measuring depth [cm]	$r_{max}$	$\tau/2$ [dni/days]	a	b
5	0,94	4	0,22	1,04
10	0,93	4	0,22	1,04
20	0,94	4	0,11	0,99
50	0,95	6	-0,26	0,86
100	0,97	26	-0,42	0,66

### 3. Przykłady wyników zastosowania metody warunków meteorologicznych poprzedzających

#### 1. Przykład weryfikacji równania regresji i zastosowania go do rekonstrukcji brakujących danych

Uzyskane dla sezonu zimowego 1991/1992 dla głębokości 100 cm równanie regresji (3)

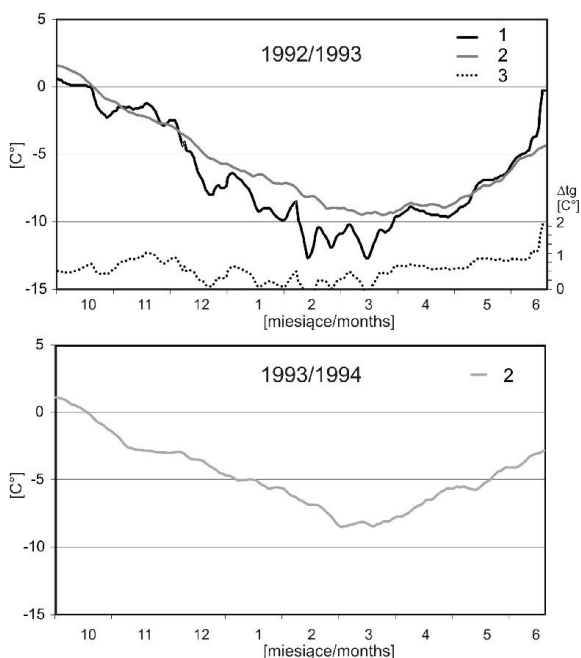
$$tg'_{100cm} = -0,676 + 0,641 \cdot tp_{pop41d} \quad (3)$$

zweryfikowano w następnym sezonie zimowym (współczynnik korelacji wyniósł 0,947), a następnie zastosowano je do rekonstrukcji brakujących danych w zimie 1993/1994 (ryc. 3). Średnia temperatura gruntu na głębokości 100 cm w zimie 1992/1993 wyniosła  $-6,7^{\circ}\text{C}$ , natomiast wyliczona z równania regresji była wyższa  $-5,8^{\circ}\text{C}$ . Średni błąd metody wyniósł  $1,2^{\circ}\text{C}$ , a maksymalny  $4,5^{\circ}\text{C}$ .

#### 2. Przykłady termoisoplei temperatury gruntu przygotowanych po uzupełnieniu brakujących danych

Metodę zastosowano również do uzupełnienia braków krótkich szeregów danych, co umożliwiło wykreślenie wykresów termoisoplei temperatury gruntu dla sezonów z lat 90-tych oraz w XXI wieku. Porównanie analizowanych wykresów jednoznacznie ilustruje zjawisko współczesnego ocieplenia. Wyraźnie zaznaczyło się ocieplenie zimowe gruntu. Szczególnie było to widoczne na przykładzie przebiegu termoisoplei  $-8,0^{\circ}\text{C}$  na głębokości 100 cm. W latach 90-tych występowała ona w okresie kilku miesięcy – nawet od grudnia do maja w sezonie 1992/1993. Natomiast w XXI wieku w okresie ciepłych zim analizowana termoisoplea występowała tylko w marcu i kwietniu (2012/2013), a nawet nie osiągała głębokości 100 cm w sezonie 2005/2006. Ciekawym przypadkiem było ocieplenie gruntu w środku zimy (11-21.01.2006), gdy temperatura gruntu w całym profilu osiągnęła wartości powyżej

-2,0°C, a nawet wartość -0,2°C na głębokości 5 cm. Podczas gdy w latach 90-tych środek zimy był okresem, w którym temperatura gruntu osiągała najniższe wartości (-26,0°C na głębokości 5 cm). Od 2005 roku nie zaobserwowano temperatury gruntu -10°C na głębokości 100 cm.



Ryc. 3. Weryfikacja równania regresji (3) uzyskanego dla sezonu zimowego 1991/1992 dla głębokości 100 cm w zimie 1992/1993 i zastosowania go do rekonstrukcji brakujących danych w zimie 1993/1994; gdzie:  
1 – temperatura gruntu pomierzona,  
2 – temperatura gruntu obliczona,  
3 –  $\Delta t$  – błąd metody.

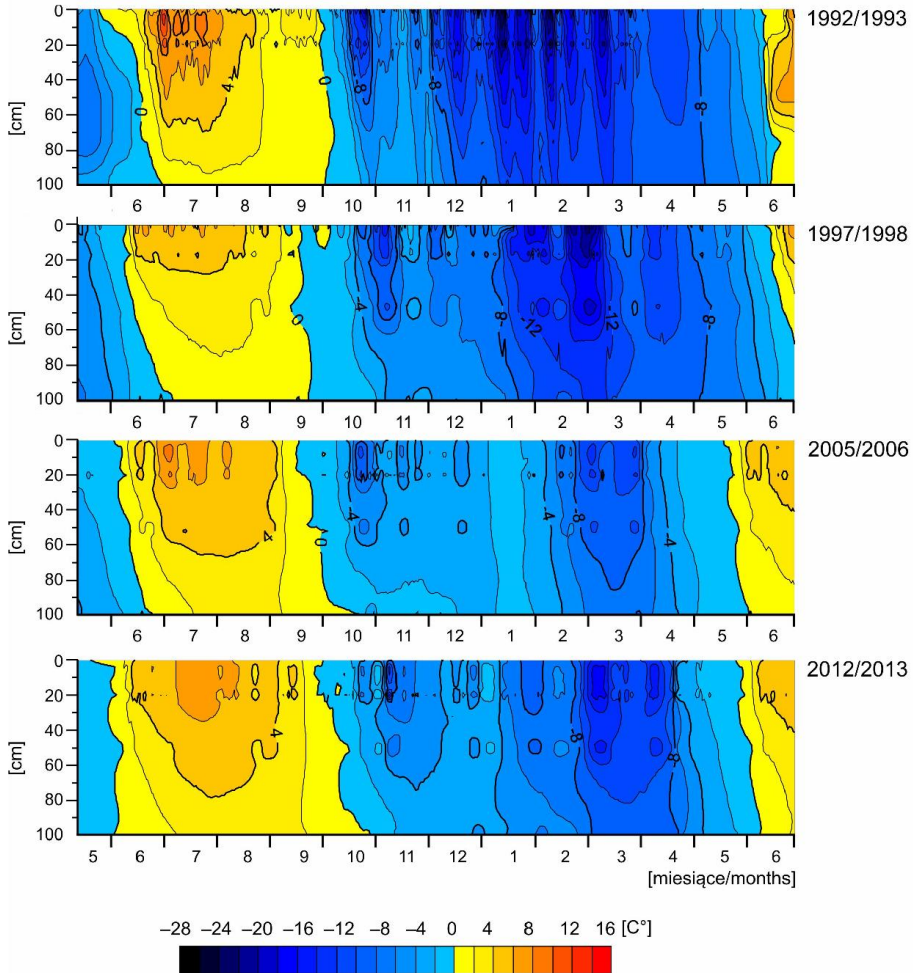
Fig. 3. Verification of the regression equation (3) obtained for the winter season of 1991/1992 for a depth of 100 cm in the winter of 1992/1993, and its application for the reconstruct of the missing data in the winter of 1993/1994, where:  
1 – the measured ground temperature  
2 – the calculated ground temperature,  
3 –  $\Delta t$  – method error.

Zmiany temperatury gruntu latem nie były tak duże jak w zimie. Zmienił się przebieg termoisoplety 0°C w przejściu koniec lata – początek zimy. W latach 90-tych przebieg termoisoplety był zbliżony do pionowego, co oznaczało zamarzanie gruntu w zbliżonym czasie w całym profilu. Natomiast w XXI wieku grunt na głębokości 100 cm zamarzał z opóźnieniem około miesiąca w stosunku do powierzchni (ryc. 4).

#### 4. Wnioski

Metoda statystyczna MWMP pozwoliła określić czas (okres poprzedzający) reakcji dla zjawisk przyrodniczych typu „przyczyna – skutek”. Zastosowana metoda umożliwiła rekonstrukcję brakujących danych temperatury gruntu na Polskiej Stacji Polarnej w Hornsundzie. Uwzględnienie czasu poprzedzającego dało wysoki przyrost współczynnika korelacji, nawet do  $r = 0,99$  w stosunku do korelacji wartości jednoczesnych ( $\tau = 0$  dni), np. wzrost współczynnika korelacji  $r$  z 0,80 do 0,99 dla temperatury gruntu na głębokości 100 cm w sezonie 2012/2013 dla okresu poprzedzającego  $\tau = 16$  dni.

Analiza długich serii czasowych (termoisoplety temperatury gruntu) pozwoliła na określenie tendencji współczesnego ocieplenia gruntu. Obserwowano wyraźną różnicę pomiędzy mroźnymi i śnieżnymi zimami w latach 90-tych i łagodnymi, mało śnieżnymi zimami w XXI wieku.



Ryc. 4. Przykładowe reżimy temperatury gruntu dla sezonów z lat 90-tych oraz w XXI wieku

Fig. 4. Examples of thermal regime of ground temperature for seasons of the 90s and in the twenty-first century.

#### Literatura

- Aalto J., Roux P.C., Luoto M., 2014. The meso-scale drivers of temperature extremes in high-latitude Fennoscandia. *Climate Dynamics*, 42: 237-252.
- Angiel M., 1994. Heat flux in selected polar soils in spring and summer (Hornsund, Spitsbergen). *Polish Polar Research* 15(1-2): 51-70.
- Arażny A., Migala K., Sikora S., Budzik T., 2010. Meteorological and biometeorological conditions in the Hornsund area (Spitsbergen) during the warm season. *Polish Polar Research* 31(3): 217-238.
- Baranowski S., 1968. Termika tundry peryglacjalnej, SW Spitsbergen. *Studia Geograficzne* 10, *Acta Universitatis Wratislaviensis* 68: 77 s.
- Bailey W.G., Oke T.R., Rouse W.R., 1997. *The Surface Climates of Canada*. McGill-Queen's University Press, Montreal Kingston, London, Buffalo: 369 s.

- Burke E.J., Hartley I.P., Jones C.D., 2012. Uncertainties in the global temperature change caused by carbon release from permafrost thawing. *The Cryosphere*, 6: 1063-1076.
- Caputa Z., Głowacki, P., 1998. Shortwave solar radiation at Hornsund (South Spitsbergen) in the 1989-1994 period. [w:] J. Bednarek, Z. Caputa (red.): *Materiały Konferencyjne, XXV Międzynarodowe Sympozjum Polarne. Komitet Badań polarnych PAN, Warszawa*: 21.
- Caputa Z., Głowacki P., 2002. Pomiary termiki gruntu oraz promieniowania słonecznego w latach 1989-1995 Hornsund, SW Spitsbergen. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 8: 111-123.
- Czepe Z., 1966. Przebieg głównych procesów morfogenetycznych w południowo-zachodnim Spitsbergenie. *Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne*, 13: 331-340.
- Dobiński W., Grabiec M., Gądek B., 2011. Spatial relationship in interaction between glacier and permafrost in different mountainous environments of high and mid-latitudes, based on GPR research. *Geological Quarterly*, 55(4): 15-27.
- Dolnicki P., 2010. Changes of thermic of the ground in Hornsund (SW Spitsbergen) in the period 1990-2009. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 20: 121-127.
- Dolnicki P., Grabiec M., Puczek D., Gawor Ł., Budzik T., Klementowski J., 2013. Variability of temperature and thickness of permafrost active layer at coastal sites of Svalbard. *Polish Polar Research*, 31(3): 217-238.
- Etzelmüller B., Schuler T.V., Isaksen K., Christiansen H.H., Farbroth H., Benestad R., 2011. Modeling the temperature evolution of Svalbard permafrost during the 20th and 21st century, *The Cryosphere*, 5: 67-79.
- Gądek B., Leszkiewicz J., 2007. Alpine snow cover influence on ground surface temperature in the zone of sporadic permafrost occurrence, Tatra Mts., Poland/Slovakia. *International Symposium on Snow Science. International Glaciological Society 37, Moscow*.
- Gądek B., Leszkiewicz J., 2009. Influence of snow cover on ground surface temperature in the zone of sporadic permafrost, Tatra Mountains, Poland and Slovakia. *Cold Regions Science and Technology*, 60: 205-211.
- Gądek B., Leszkiewicz J., 2012. Impact of climate warming on the ground surface temperature in the sporadic permafrost zone of the Tatra Mountains, Poland and Slovakia. *Cold Regions Science and Technology*, 79-80: 75-83.
- Głowacki P., 2007. Rola procesów fizyczno-chemicznych w kształtowaniu struktury wewnętrznej i obiegu masy lodowców Spitsbergenu. *Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Science, Warszawa, Monographic M 30 (400)*: 147 s.
- Głowicki B., 1985. Heat exchange in the subsurface of soil layer in the Hornsund area (Spitsbergen). *Polish Polar Research* 6(3): 331-340.
- Gisnås K., Etzelmüller B., Farbroth H., Schuler T.V., Westermann S., 2013. CryoGRID 1.0: Permafrost Distribution in Norway estimated by a Spatial Numerical Model. *Permafrost and Periglacial Processes*, 24: 2-19.
- Gisnås K., Westermann S., Schuler T.V., Litherland T., Isaksen K., Boike J., Etzelmüller B., 2014. A statistical approach to represent small-scale variability of permafrost temperatures due to snow cover. *The Cryosphere*, 8: 2063-2074.
- Grześ M., 1984. Charakterystyka warstwy czynnej wieloletniej zmarzliny na Spitsbergenie. [w:] Stankowski W. (red.), *XI Sympozjum Polarne. Poznań*: 65-83.
- Harris C., Arenson L.U., Christiansen H.H., Etzelmüller B., Frauenfelder R., Gruber S., Haeberli W., Hauck C., Hölzl M., Humlum O., Isaksen K., Kääb A., Kern-Lütschig M.A., Lehning M., Matsuoka N., Murton J.B., Nötzli J., Phillips M., Ross N., Seppälä M., Springman S.M., Vonder Mühll D., 2009. Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. *Earth-Sci. Rev.*, 92: 117-171.
- Haasa T., Kleinhans M.G., Carbonneau P.E., Rubensdotter L., Haubere E., 2015. Surface morphology of fans in the high-Arctic periglacial environment of Svalbard: Controls and processes. *Earth-Science Reviews* 146: 163-182.



- Hipp T., Etzelmüller B., Farbrot H., Schuler T.V., Westermann S., 2012. Modelling borehole temperatures in Southern Norway – insights into permafrost dynamics during the 20th and 21st century. *The Cryosphere*, 6: 553-571.
- Kamiński A., Wach J., 1993. The ground temperature of permafrost active layer in the Fugleberget catchment basin (SW Spitsbergen) in the winter season 1985/1986. [w:] Repelewska-Pękałowa J., Pękała K. (eds), XX Polar Symposium, Man Impact on Polar Environment, Lublin: 361-367.
- Kwaśniewska E., Pereyma J., 2004. Termiczne pory roku w Hornsundzie (SW Spitsbergen). *Problemy Klimatologii Polarnej*, 14, 157-169.
- Leszkiewicz J., 1987. Charakterystyczne cechy zlewni polarnych oraz próba modelowania statystycznego topnienia śniegu i odpływu ablacyjnego w zachodniej części Spitsbergenu. *Prace Naukowe Uniwersytetu Śląskiego* 920: 84 s.
- Leszkiewicz J., Caputa Z., 2004. The thermal condition of the active layer in the permafrost at Hornsund, Spitsbergen. *Polish Polar Research*, 25(3-4): 223-239.
- Leszkiewicz J., Rózkowski J., 2000. Response of karstic-fissured springs to infiltration recharge in the area of Ojców National Park (Cracow Upland, Southern Poland). *Kras i Speleologia*, 10: 27-44.
- Leszkiewicz J., Rózkowski J., Tyc A., 1991. Dynamika wahań zwierciadła wód podziemnych poziomu górnourajskiego i jej związek z opadami atmosferycznymi na przykładzie wybranych studni położonych na Wyżynie Krakowsko-Częstochowskiej. (Wyniki wstępne). [w:] *Przeobrażenia stosunków wodnych na obszarach silnej antropopresji*. Uniwersytet Śląski, Sosnowiec: 17-25.
- Leszkiewicz J., Rózkowski J., Tyc A., 1993. Reakcja zwierciadła wód podziemnych poziomu górnourajskiego w południowej części Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej na zasilanie roztopowe. *Kras i Speleologia*, 7(16): 43-56.
- MacDougall A., Avis C., Weaver A., 2012. Significant contribution to climate warming from the permafrost carbon feedback. *Nature Geoscience*, 5: 719-721.
- Marsz A.A., Styszyńska A. (red.), 2007. *Klimat rejonu Polskiej Stacji Polarnej w Hornsundzie – stan, zmiany i przyczyny*. Wydawnictwo Akademii Morskiej, Gdynia: 376 s.
- Marsz A., Styszyńska A. (eds.), 2013. *Climate and Climate Change at Hornsund, Svalbard*. Gdynia Maritime University, Gdynia: 402 s.
- Marsz A.A., Pękała K., Repelewska-Pękałowa J., Styszyńska A., 2011. Zmienność maksymalnej miąższości czynnej warstwy zmarzliny w rejonie Bellsundu (w Spitsbergen) w okresie 1986–2009. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 21: 133-154.
- Miętus M., 1992. Statistical characteristics of soil temperature at the depth of 5 cm in thermal seasons, Hornsund, Spitsbergen. *Polish Polar Research*, 13(2): 103-112.
- Miętus M., Filipiak J., 2001. Temperatura gruntu w rejonie Stacji Polarnej w Hornsundzie. *Problemy Klimatologii Polarnej*, 11: 67-80.
- Migala K., 1990. Active layer of permafrost in the light of Hornsund climatic conditions, SW Spitsbergen. [w:] *Spitsbergen Geographical Expeditions of M. Curie-Skłodowska University, Materials of Polar Session, Periglacial Phenomena of Western Spitsbergen*, UMCS, Lublin: 215-226.
- Migala K., 1991. Effect of the winter season and snow cover on the active layer of permafrost in the region of Hornsund (SW Spitsbergen). [In:] *Repelewska-Pękałowa J., Pękała K. (eds.), Spitsbergen Geographical Expeditions, Polar Session, Arctic Environment Research*, UMCS, Lublin: 241-256.
- Migala K., Głowacki P., Klementowski J., 2004. Dynamika rozmarzania warstwy aktywnej zmarzliny w rejonie Hornsundu (SW Spitsbergen) i jej przyczyny. *Polish Polar Studies*, 30: 251-262.
- Niedźwiedz T., 1992. Extreme surface temperature of Arctic tundra (SW Spitsbergen). [w:] *Repelewska-Pękałowa J., Pękała K. (eds.), Spitsbergen Geographical Expeditions of M. Curie-Skłodowska University, UMCS*. Lublin: 39-51.

- Pereyma J., 1983. Climatological problems of the Hornsund area, Spitsbergen. *Acta Universitatis Wratislaviensis* 714: 131 s.
- Przybylak R., 2007. Recent air-temperature changes in the Arctic. *Annals of Glaciology*, 46: 316-324.
- Repelewska-Pękałowa J., Magierski J., 1989. Permafrost active layer: dynamics and chemical properties of waters, *Calypsostranda*, the summer-autumn season of 1988. [w:] Spitsbergen Geographical Expeditions of M. Curie-Skłodowska University, UMCS. Lublin: 79-84.
- Riseborough D., Shiklomanov N., Etzelmüller B., Gruber S., Marchenko S., 2008. Recent Advances in Permafrost Modelling. *Permafrost and Periglacial Processes*, 19: 137-156.
- Sikora S., Puczek D., Soroka J., Głowacki P., 2010. Nowa automatyczna stacja meteorologiczna w Polskiej Stacji Polarnej im. Stanisława Siedleckiego (Hornsund, Svalbard). *Problemy Klimatologii Polarnej*, 20: 187-196.
- Tam A., Gough W.A., Xie Ch., 2015. An Assessment of Potential Permafrost along a North-South Transect in Canada under Projected Climate Warming Scenarios from 2011 to 2100. *International Journal of Climate Change: Impacts and Responses*, 6(2): 1-18.
- Wijngaarden W.A., 2014. Arctic temperature trends from the early nineteenth century to the present. *Theoretical and Applied Climatology*, 122(3): 567-580, DOI 10.1007/s00704-014-1311-z

Wpłynęło: 6 września 2015 r., poprawiono: 6 listopada 2015 r., zaakceptowano: 22 listopada 2015 r.

## Summary

The ground temperature is an important indicator of the state of permafrost and the active layer, especially during the contemporary warming. It affects geomorphological, hydrological and other phenomena, which occur mainly in the active layer, whereas the total freezing of the ground effectively inhibits their course. Hence the great interest in the ground temperature data. However, the historical data is often characterized by the lack of measurements or short series, or even errors. Therefore, adopting an effective method for the reconstruction of the data of the ground temperature at different depths can facilitate research on the ground temperature. The method of preceding weather conditions allows reconstruction of the missing statistical data series based on the air temperature or other factors with great efficiency. The effectiveness of the method is illustrated by the example of the missing ground temperature measurements at the Polish Polar Station. A high correlation ( $r > 0.9$ ) and statistical significance of the relationship between the preceding air temperature and the temperature of the ground. The length of the response time (half of the preceding time) was: 1-4 days for the subsurface ground temperature (a depth of 5, 10 and 20cm) and 8-26.5 days for the ground temperature at a depth of 100cm. The analysis of long time series allowed detecting the trends of the modern warming of the ground, for example the disappearance of the ground temperature of  $-10^{\circ}\text{C}$  at a depth of 100cm since 2005.

**Key words:** ground temperature, Spitsbergen, statistical method, reconstruction of missing data.