

Zmienność temperatury u spodu sezonowej pokrywy śnieżnej w strefie sporadycznego występowania wieloletniej zmarzliny w Tatrach

Bogdan Gądek*, Jan Leszkiewicz

Uniwersytet Śląski, Katedra Geomorfologii, ul. Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec

Wprowadzenie

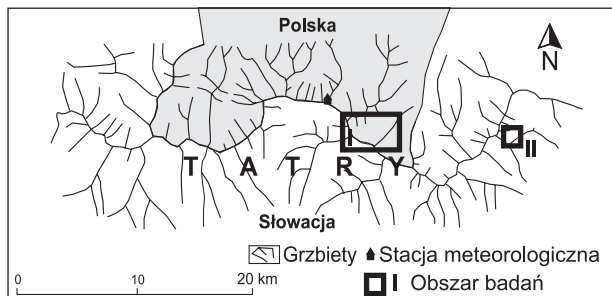
Pokrywa śnieżna ze względu na swoją niską przewodność termiczną chroni podłoże przed zimową utratą ciepła. Natomiast jej wysokie albedo i entalpia przejścia fazowego ograniczają przepływ ciepła z atmosfery do gruntu podczas roztopów (Zhang 2005). W zależności od bilansu ciepła powierzchni gruntu wieloletnia zmarzlina może rozwijać się zarówno u spodu niskiej, jak i wysokiej sezonowej pokrywy śnieżnej (m.in. Goodrich 1982). W tym ostatnim przypadku przyczyną może być także zimowa cyrkulacja powietrza wewnątrz stoków usypiskowych i lodowców gruzowych (m.in. Delaloye, Lambiel 2005). O istnieniu lub braku wieloletniej zmarzliny może świadczyć wartość temperatury u spodu pokrywy śnieżnej (BTS – Bottom Temperature of Snow Cover) o grubości >80 cm, zmierzona przed wiosennymi roztopami. Empirycznie ustalone przez Haerberliego (1973) wartości progowe BTS równe -2°C i -3°C sugerują odpowiednio: brak, możliwość istnienia i prawdopodobne istnienie wieloletniej zmarzliny. Metoda BTS zdobyła szerokie zastosowanie w kartowaniu wieloletniej zmarzliny w obszarach górskich (por. Lewkowicz, Ednie 2004), a słuszność jej założeń potwierdzili Hoelze i in. (1999) wynikami monitoringu temperatury powierzchni gruntu z wykorzystaniem miniaturowych rejestratorów. Jednak Brenning i in. (2005) wykazali zawodność tej metody ze względu na zmienność BTS w czasie i przestrzeni. W piętrze alpejskim Tatr stwierdzono, że pokrywa śnieżna zwykle nie chroni swego podłoża przed zamrażaniem, ale zależnie od swej grubości i gęstości oraz ilości ciepła w gruncie zmniejsza amplitudy i wydłuża czas

reakcji BTS na zmiany temperatury powietrza. Nawet w przypadku pokrywy śnieżnej mającej przez kilka miesięcy kilkumetrową grubość zarejestrowano powolne obniżanie się temperatury u jej spodu aż do osiągnięcia minimum pod koniec zimy – także w miejscach, gdzie wykluczono możliwość cyrkulacji powietrza w gruncie (Gądek, Kędzia 2008). W artykule przedstawiono statystyczną zależność pomiędzy temperaturą powietrza, grubością pokrywy śnieżnej i temperaturą u jej spodu w strefie sporadycznego występowania wieloletniej zmarzliny w Tatrach oraz wyniki modelowania wartości BTS w latach 1954–2005 na podstawie danych meteorologicznych.

Obszar badań i dane źródłowe

W pracy wykorzystano wyniki monitoringu BTS prowadzonego na 5 bezglebowych stanowiskach położonych w Miedzianej Kotlinie (MK), Świstówce Roztockiej (SR) i Dolinie Pięciu Stawów Polskich (PK, PB i PS), w piętrze alpejskim Tatr Wysokich (ryc. 1), gdzie średnia roczna temperatura powietrza wynosi od 0°C do -2°C (Hess 1996). Stanowiska pomiarowe były rozmieszczone w odmiennych warunkach topograficznych, na wypukłych, wyrównanych i wklęsłych formach terenu – w miejscach, w których wcześniej stwierdzono istnienie współczesnej lub reliktywnej wieloletniej zmarzliny (tab. 1). Pomiary były wykonywane co godzinę w okresie od 2.10.2003 do 12.05.2005. Zastosowano miniaturowe rejestratory *Onset Hobo Pro* wyposażone w termistory zapewniające dokładność pomiaru lepszą niż $0,4^{\circ}\text{C}$. Wykorzystano także dobowe wartości temperatury powie-

* e-mail: bogdan.gadek@us.edu.pl



Ryc. 1. Położenie obszarów badań
I – Miedziana Kotlina, II – Dolina Pięciu Stawów Polskich i Świstówka Roztocka

trza i grubości pokrywy śnieżnej na stacji synoptycznej IMGW na Kasprowym Wierchu (1991 m n.p.m.) z lat 1954–2005. Jest to jedyna stacja meteorologiczna w piętrze alpejskim Tatr.

Metody badań

W badaniach wieloletniej zmienności wartości BTS zastosowano statystyczną metodę warunków meteorologicznych poprzedzających (Leszkiewicz 1987). Obliczenia wykonano w programie Statistica (*StatSoft*) w trzech etapach:

- 1) Obliczono współczynniki korelacji (r) pomiędzy wszystkimi dobowymi wartościami BTS na każdym stanowisku a średnimi wartościami temperatury powietrza lub grubości pokrywy śnieżnej w okresach poprzedzających. Przyjmowano kroko-wo narastającą długość okresów poprzedzających od 0 do 250 dni:

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

gdzie: $X(t, \tau)$ – średnia temperatura powietrza lub grubość pokrywy śnieżnej dla czasu poprzedzającego τ (0, 2, ...20, 24, ...40, 50, 60, 80, ...200, 250 dni) przy-
porządkowana do czasu t (kolejne dni zim 2003/2004 i 2004/2005); $X_{t-\tau}$ – temperatura powietrza lub gru-
bość pokrywy śnieżnej w czasie $t-\tau$.

- 2) Ujawnione zależności pomiędzy temperaturą powietrza i grubością pokrywy śnieżnej na Kas-prowym Wierchu a wartościami BTS na poszcze-gólnych stanowiskach pomiarowych opisano równaniem regresji liniowej:

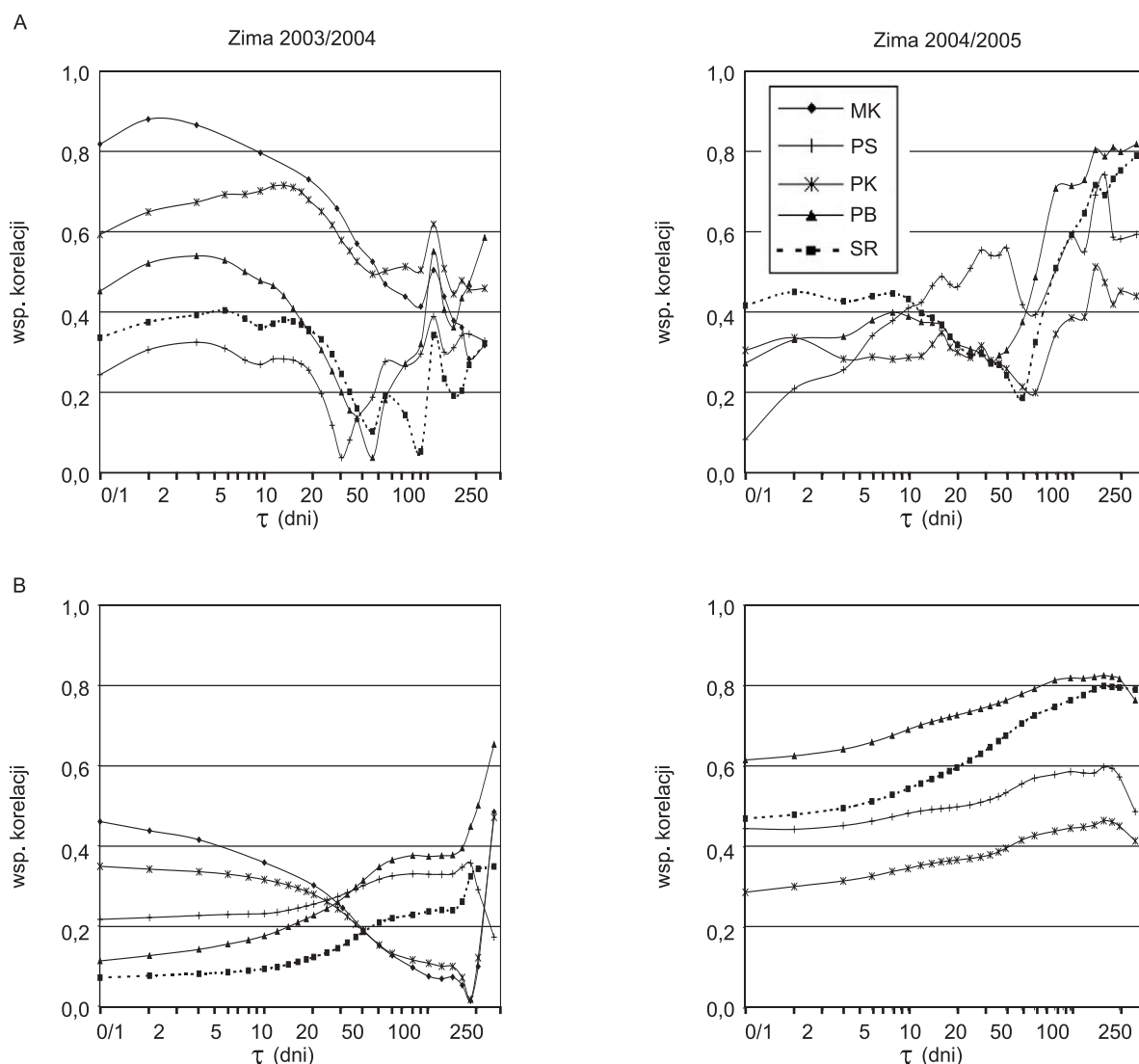
$$BTS(PT, PSn, N)_{\text{stanowisko}} = a + b \cdot PT_{\tau_1} + c \cdot PSn_{\tau_2} + d \cdot PT_{\tau_3} + e \cdot PSn_{\tau_4} + \frac{f}{N}$$

gdzie: BTS – temperatura spodu pokrywy śnieżnej, PT – temperatura powietrza poprzedzająca, PSn – grubość pokrywy śnieżnej poprzedzającej, $a-f$ – pa-
rametry równania regresji, $\tau_1-\tau_4$ – statystycznie naj-
istotniejsze okresy poprzedzające określone na pod-
stawie macierzy [3], wynosiły one 0–28 dni (τ_1 i τ_2)
oraz 120–250 dni (τ_3 i τ_4).

- 3) Wykorzystując model statystyczny [2] i archiwalne dane meteorologiczne z Kasprowego Wierchu obliczono wartości BTS na poszczególnych stano-wiskach pomiarowych w poprzednich pięćdzie-sięciu latach. Założono przy tym, że: a) na początku zimy temperatura powierzchni gruntu może oscylować wokół 0°C, b) w okresie rozwoju

Tabela 1. Charakterystyka miejsc pomiaru temperatury powierzchni gruntu u spodu pokrywy śnieżnej

Lokalizacja	Symbol stanowiska	Wysokość (m a.s.l.)	Eksp.	Forma terenu	Występowanie wieloletniej zmarzliny w świetle literatury		
					możliwość istnienia	metody detekcji	literatura
Miedziana Kotlina	MK	2030	N	morena czołowo-boczna	tak	wychodnia pogrzebanego lodu pomiar georadarowe sondowania elektrooporowe sondowania elektromagnetyczne	Gądek i in. (2006)
Świstówka Roztocka	SR	1820	NNE	lodowiec gruzowy (powierzchnia wyrównana)	tak (reliktowa)	sondowania elektrooporowe BTS	Dobiński (2004)
Dolina Pięciu Stawów Polskich	PK	1930	SW	pokrywa morenowa	tak (reliktowa)		
	PB	1785	SE	lodowiec gruzowy (obniżenie)	tak (reliktowa)		
	PS	1980	N	podprzełęczowy lodowiec gruzowy	brak danych		



Ryc. 2. Współczynniki korelacji pomiędzy wartościami BTS na stanowiskach pomiarowych i temperaturą powietrza (A) oraz grubością pokrywy śnieżnej (B) na Kasprowym Wierchu

trwałej i suchej pokrywy śnieżnej wartości BTS są ujemne, c) w okresie roztopów temperatura u spodu pokrywy śnieżnej wynosi 0°C .

Wyniki

Obliczone współczynniki korelacji pomiędzy wartościami BTS w kolejnych dniach dwóch zim a średnią grubością pokrywy śnieżnej i średnią temperaturą powietrza w okresach poprzedzających przedstawiono na rycinie 2. Zidentyfikowano trzy typy korelogramów, zgodne z typami reżimów termicznych u spodu pokrywy śnieżnej:

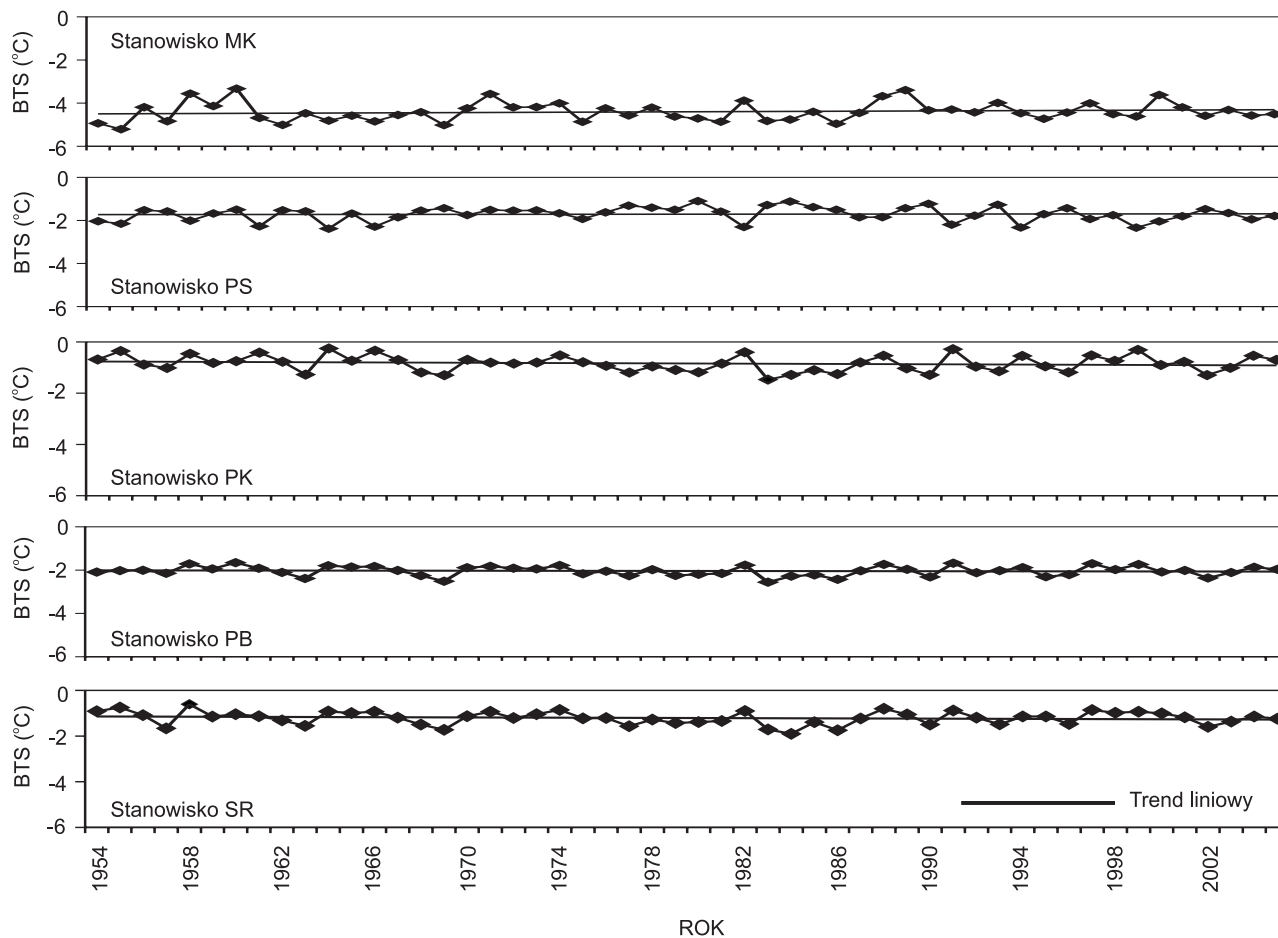
1. Maksimum korelacji BTS z temperaturą powietrza w krótkich okresach poprzedzających.

Ten typ korelogramu świadczy o krótkookresowych zmianach temperatury powierzchni gruntu pod cienką pokrywą śnieżną. Temperatura powietrza ma przy tym wyraźnie większe znaczenie niż grubość po-

krwy śnieżnej. Na stanowisku MK największy wpływ na BTS miała średnia dwudniowa wartość poprzedzającej temperatury powietrza. Znaczenie temperatury powietrza w dłuższych okresach poprzedzających generalnie malało, podobnie jak znaczenie pokrywy śnieżnej. Jednak w obu przypadkach wartości współczynników korelacji wyraźnie wzrosły po uwzględnieniu w obliczeniach odpowiednio sezonu letniego ($\tau = 120$ dni) i poprzedniego sezonu zimowego ($\tau = 250$ dni). Mogą one odzwierciedlać wpływ ciepła zawartego w gruncie na zimowe wychładzanie spodu pokrywy śnieżnej.

2. Zbliżone maksima korelacji BTS z temperaturą powietrza w krótkich oraz długich okresach poprzedzających.

Ten typ korelogramu świadczy o stopniowym wzroście pokrywy śnieżnej. W pierwszym stadium narastania pokrywy śnieżnej na stanowiskach PK, PB, PS i SR (zima 2003/2004) największy wpływ na BTS miała średnia temperatura powietrza w 4–18 dniowych okresach poprze-



Ryc. 3. Średnie zimowe temperatury gruntu u spodu pokrywy śnieżnej w latach 1954–2005 obliczone na podstawie modelu (2) (objaśnienia w tekście)

dzających. Natomiast wartości BTS w stadium wysokiej pokrywy śnieżnej cechowała duża korelacja ze średnią temperaturą powietrza w poprzedzających okresach obejmujących sezon letni ($\tau = 120$ dni). Na najniższej położonych stanowiskach (PB i SR) istotna też była temperatura powietrza w poprzednim sezonie zimowym ($\tau = 250$ dni), a na stanowiskach wyżej położonych (PS i PK) także temperatura powietrza w sezonie wiosennym ($\tau = 180$ dni). W ten sposób zaznaczył się na korelogramach czas trwania pokrywy śnieżnej (lokalnie uwarunkowany). Statystyczna zależność relacji BTS–temperatura powietrza malała wraz ze wzrostem tempa akumulacji śniegu. Tempo przyrostu pokrywy śnieżnej odzwierciedliły także kształty korelogramów BTS–grubość pokrywy śnieżnej. Zmieniały się one od typowych dla niskiej (PK) do typowych dla wysokiej pokrywy śnieżnej (PS). Generalnie statystycznie najistotniejszy w kształtowaniu BTS był łączny wpływ temperatury powietrza i wysokości pokrywy śnieżnej w 12–18-dniowym okresie poprzedzającym.

3. Maksimum korelacji BTS z temperaturą powietrza w długich okresach poprzedzających. Ten typ korelogramu świadczy o grubej pokrywie śnieżnej, która chroni podłoże przed wpływem krótkookresowych zmian temperatury powietrza. Szybki

wzrost pokrywy śnieżnej na badanych stanowiskach w sezonie zimowym 2004/2005 odzwierciedliły silne statystyczne związki BTS i grubości pokrywy śnieżnej oraz BTS i średniej temperatury powietrza w poprzedzających okresach obejmujących sezon letni. Korelogramy dotyczące najwyżej położonego stanowiska PS ujawniły też istotne znaczenie średniej miesięcznej poprzedzającej temperatury powietrza. Natomiast w przypadku pozostałych stanowisk (PK, PB, SR) odzwierciedliły bardzo słaby, ale powtarzający się wpływ średniej kilkudniowej (początek zimy i odwilże) i kilkutygodniowej poprzedzającej temperatury powietrza. Generalnie wyniki korelacji świadczą, że wymiana ciepła pomiędzy powierzchnią u spodu pokrywy śnieżnej i atmosferą była wówczas mała, a wartości BTS w znacznym stopniu kształtował strumień ciepła z wnętrza gruntu.

Wyniki statystycznego modelowania wartości BTS na poszczególnych stanowiskach w latach 1954–2005 na podstawie danych meteorologicznych z Kasprowego Wierchu przedstawiono na rycinie 3. Świadczą one, że spośród badanych stanowisk tylko w Miedzianej Kotlinie istnieją warunki sprzyjające rozwojowi współczesnej wieloletniej zmarzliny. Wieloletnia zmienność obliczonych wartości nie wykazywała żadnych tendencji.

Wnioski

- 1) Wartości temperatury u spodu pokrywy śnieżnej związane są z temperaturą powietrza w kilkudniowym/kilkutygodniowym okresie poprzedzającym oraz z ilością ciepła zawartego w gruncie. Znaczenie obu czynników zależy przede wszystkim od grubości i czasu trwania pokrywy śnieżnej.
- 2) Coroczne zmiany BTS mogą być związane nie tylko ze zmianami grubości pokrywy śnieżnej i temperatury powietrza w zimie, ale także ze zmianami temperatury powietrza latem.
- 3) Zmienność temperatury powierzchni gruntu w sezonach zimowych 1954/55–2004/2005 w strefie sporadycznego występowania wieloletniej zmarzliny w Tatrach nie wykazywała żadnej tendencji.

Literatura

- Brenning A., Gruber S., Hoelzle M. 2005. Sampling and Statistical Analyses of BTS Measurements. *Permafrost and Periglacial Processes*, 16: 383–393.
- Delaloye R., Lambiel Ch. 2005. Evidence of winter ascending air circulation throughout talus slopes and rock glaciers situated in the lower belt of alpine discontinuous permafrost (Swiss Alps). *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 59: 194–203.
- Dobiński W. 2004. Wieloletnia zmarzlina w Tatrach: geneza, cechy, ewolucja. *Przegląd Geograficzny*, 76: 237–343.
- Gądek B., Kędzia S. 2008. Winter Ground Surface Temperature Regimes in the Zone of Sporadic Discontinuous Permafrost, Tatra Mountains (Poland and Slovakia). *Permafrost and Periglacial Processes*, 17, 3, w druku.
- Gądek B., Rączkowska Z., Wzientek K., Żogała B. 2006. Wieloletnia zmarzlina Miedzianej Kotliny (Tatry Słowackie) w świetle wyników badań geofizycznych i geomorfologicznych. [W:] A. Kotarba, W. Borowiec (red.), *Przyroda Tatrzańskiego Parku Narodowego a Człowiek*. 1. PTPNoZ-TPN, Zakopane, s. 100–108.
- Goodrich L.E. 1982. The influence of snow cover on the ground thermal regime. *Canadian Geotechnical Journal*, 19: 421–432.
- Haerberli W. 1973. Die Basis Temperatur der winterlichen Schneedecke als möglicher Indikator für die Verbreitung von Permafrost in den Alpen. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 9: 221–227.
- Hess M. 1996. Klimat. [W:] Z. Mirek (red.), *Przyroda Tatrzańskiego Parku Narodowego*. TPN, Kraków–Zakopane, s. 53–69.
- Hoelze M., Wegmann M., Krummenacher B. 1999. Miniature temperature dataloggers for mapping and monitoring of permafrost in high mountain areas: first experience from the Swiss Alps. *Permafrost and Periglacial Processes*, 10: 113–124.
- Leszkiewicz J. 1987. Charakterystyczne cechy zlewni polarnych i próba modelowania statystycznego topnienia śniegu i odpływu ablacyjnego w zachodniej części Spitsbergenu. *Prace Naukowe Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach*, 920: 86.
- Lewkowicz A.G., Ednie M. 2004. Probability mapping of mountains permafrost using the BTS method, Wolf Creek, Yukon Territory, Canada. *Permafrost and Periglacial Processes*, 15: 67–80.
- Zhang T. 2005. Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: An overview. *Reviews of Geophysics*, 43, RG4002.