

Problemy detekcji wieloletniej zmarzliny na podstawie temperatury u spągu zimowej pokrywy śnieżnej na przykładzie Tatr

*The problem of permafrost detection based on bottom temperature
snow cover – the Tatra Mts. case*

BOGDAN GADEK

Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski, 41-200 Sosnowiec, ul. Będzińska 60;
bogdan.gadek@us.edu.pl

STANISŁAW KĘDZIA

Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. S. Leszczyckiego PAN,
31-018 Kraków, ul. Św. Jana 22; kedzia@zg.pan.krakow.pl

Zarys treści. W pracy przedstawiono wyniki zimowego monitoringu temperatury powierzchni gruntu w piętrze alpejskim Tatr, na stanowiskach, w których wcześniej udokumentowano istnienie lub brak wieloletniej zmarzliny. Świadczą one, że (1) konwencjonalna interpretacja wyników kartowania wieloletniej zmarzliny metodą BTS może być zawodna; (2) współczesna wieloletnia zmarzlina w piętrze alpejskim Tatr rozwija się zarówno pod cienką jak i pod grubą pokrywą śnieżną, a jej istnienie może być związane głównie z lokalną cyrkulacją zimnego powietrza nad powierzchnią terenu.

Słowa kluczowe: wieloletnia zmarzlina, temperatura powierzchni gruntu, BTS, Tatry.

Wstęp

Wieloletnia zmarzlina jest czułym na zmiany klimatyczne elementem wysokogórskich geosystemów. Zmiany jej temperatury i grubości warstwy czynnej wpływają na procesy morfodynamiczne (Gude i Barch, 2005), hydrologiczne (Hinzman i inni, 2003), niwalne (Phillips i Schweizer, 2007) oraz na zbiorowiska roślinne i obieg węgla (Jorgenson i inni, 2001; Genxu i inni, 2008). Kartowanie wieloletniej zmarzliny w górach wysokich jest logistycznie bardzo trudne. Przyczyną jest rzeźba terenu, która ogranicza możliwości prac terenowych oraz wpływa na zmienność warunków topoklimatycznych i tym samym na duże przestrzenne zróżnicowanie bilansu cieplnego gruntu (Salzmann i inni,

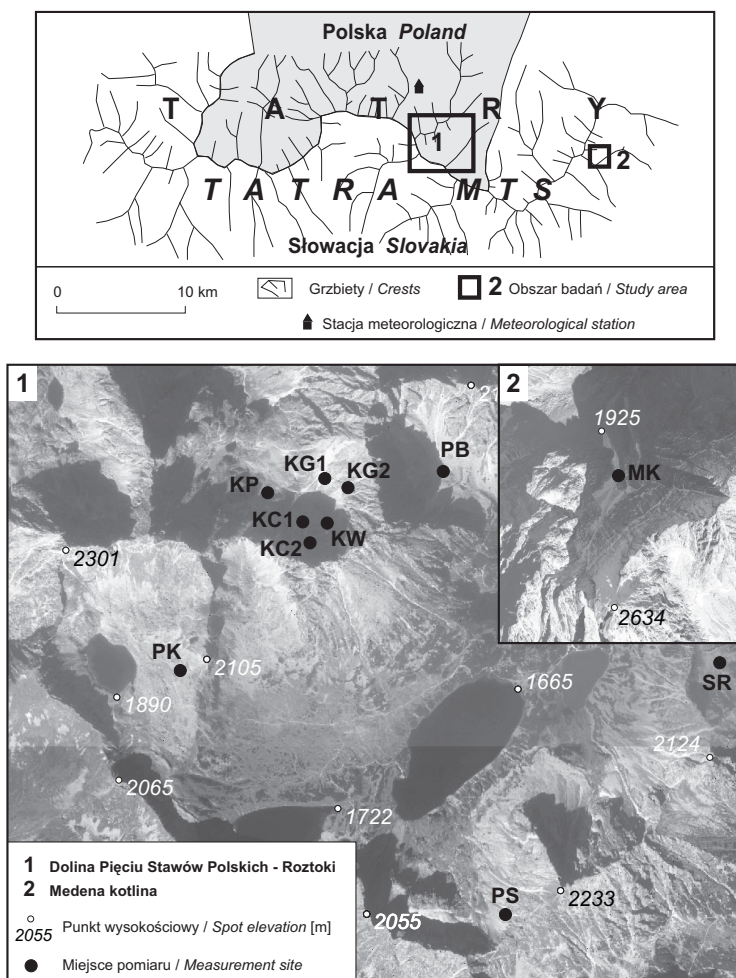
2007). Najłatwiejszym do określenia wskaźnikiem istnienia lub braku wieloletniej zmarzliny jest temperatura u spągu zimowej pokrywy śnieżnej (BTS – *die Basis-Temperatur der winterlichen Schneedecke; the Bottom Temperature of the winter Snow cover*). Podstawą tej metody są dwa założenia (Haeberli, 1973): (1) pomiary temperatury u spągu suchej pokrywy śnieżnej wykonywane są w środku lub pod koniec zimy, w miejscach gdzie jej grubość wynosi co najmniej 0,8 m; (2) wartości BTS są kształtowane przez strumień ciepła w przypowierzchniowej warstwie gruntu i są odzwierciedleniem warunków termicznych pod powierzchnią. W. Haeberli (1978) empirycznie ustalił graniczne wartości BTS pomiędzy miejscami, w których istnienie wieloletniej zmarzliny jest: (a) prawdopodobne ($< -3\text{ }^{\circ}\text{C}$); (b) możliwe ($-3\text{ }^{\circ}\text{C} \div -2\text{ }^{\circ}\text{C}$) lub (c) wątpliwe ($> -2\text{ }^{\circ}\text{C}$). Metoda BTS jest powszechnie wykorzystywana do kartowania wieloletniej zmarzliny w różnych strefach geograficznych (m.in. Hoelzle i inni, 1993; Ishikawa i Hirakawa, 2000; Lewkowicz i Ednie, 2004). Od około 10 lat stosuje się do tego celu miniaturowe rejestratory temperatury (Hoelzle i inni, 1999; Ishikawa, 2003; Delaloye i Lambiel, 2005). Wieloletnie dane świadczą jednak o dużej czasoprzestrzennej zmienności BTS – co może być istotne w badaniach wieloletniej zmarzliny (Brenning i inni, 2005).

Istnienie wieloletniej zmarzliny w Tatrach, w innej postaci niż lód jaskiniowy, pierwszy stwierdził W. Dobiński (1996, 1997; Dobiński i inni, 1996) na podstawie wyników badań klimatologicznych i geofizycznych (wykonanych głównie w Dolinie Pięciu Stawów Polskich). Jego zdaniem wieloletnia zmarzlina występuje już od wysokości 1700 m npm., przy czym poniżej 1930 m npm. ma ona charakter reliktowy. Natomiast strefa wieloletniej zmarzliny ciągłej istnieje prawdopodobnie powyżej 2500 m npm. (Dobiński, 2004). Wyniki pomiarów BTS, elektrooporowych, georadarowych i termowizyjnych w zawieszonym cyрку glacialnym – Koziej Dolince (1930–2020 m npm.), ujawniły istnienie płatów współczesnej wieloletniej zmarzliny na stokach o ekspozycji północnej (Kędzia i inni, 1998; Mościcki i Kędzia, 2001; Kędzia, 2004; Lamparski i Kędzia, 2007). Ponadto w gruzowym podłożu Miedzianej Kotliny (2000 m npm.) w Tatrach Słowackich stwierdzono wychodnię masywnego lodu, która stanowi pogrzebaną część współczesnego lodowczyka, zasilanego głównie lawinami śnieżnymi (Gądek i Kotyrba, 2003; Gądek i Żogała, 2005; Gądek i inni, 2006).

W miejscach, w których wcześniej udokumentowano istnienie współczesnej lub reliktywnej wieloletniej zmarzliny oraz tam, gdzie udokumentowano jej brak, autorzy prowadzili 2-letni monitoring temperatury powierzchni gruntu. Dało to okazję do przetestowania przydatności metody BTS w kartowaniu wieloletniej zmarzliny oraz podjęcie dyskusji na temat możliwości jej współczesnego rozwoju w piętrze alpejskim Tatr.

Obszar i metody badań

Monitoring temperatury powierzchni gruntu prowadzono w zawieszonych cyrkach postglacjalnych: Miedzianej Kotlinie, Koziej Dolince, Świstówce Roztockiej i Dolinie Pięciu Stawów Polskich, na 11 bezglebowych stanowiskach rozmieszczonych w odmiennych warunkach topograficznych w strefie wysokościowej od 1785 do 2030 m npm. (ryc. 1). Informacje o wysokości, ekspozycji



Ryc. 1. Lokalizacja obszaru badań i stanowisk pomiarowych (Kozia Dolinka – KW, KP, KG1, KG2, KC1, KC2; Miedziana Kotlina – MK; Dolina Pięciu Stawów Polskich – PS, PK, PB, SR)
Location of study area and measurement sites (Kozia Dolinka – KW, KP, KG1, KG2, KC1, KC2; Miedziana Kotlina – MK; Dolina Pięciu Stawów Polskich – PS, PK, PB, SR)

Tabela 1. Charakterystyka miejsc pomiaru temperatury powierzchni gruntu
 A characterisation of the GST measurement sites

Lokalizacja	Stano- wisko	Wysokość (m n.p.m.)	Ekspozycja	Forma terenu	Występowanie wieloletniej zmarzliny w świetle literatury		
					obecność	zastosowane metody	źródło
Miedziana Kotlina	MK	2030	N	morena czołowo-boczna wychodnia pogrzebanego łodu	tak	pomiary georadarowe sondowania elektrooporowe sondowania elektromagnetyczne	Gądek i Kotyrba (2003) Gądek i Żogała (2005) Gądek i inni (2006)
Kozia Dolinka	KW	1965	NW	stożek usypiskowy	tak	sondowania elektrooporowe BTS pomiary termowizyjne pomiary georadarowe	Kędzia i inni (1998) Mościcki i Kędzia (2001) Kędzia (2004) Lamparski i Kędzia (2007)
	KC1	1955	NNW	obniżenie pomiędzy stożkami usypiskowymi	tak		
	KC2	2020	N	wychodnia skalna	nie		
	KG1	1980	SSW	stożek usypiskowy	nie		
	KG2	1990	WSW	stożek usypiskowy	nie		
	KP	1940	WNW	próg skalny z pokrywą morenową	nie		
Świstówka Roztocka	SR	1820	NNE	lodowiec gruzowy (powierzchnia wyrównana)	tak (reliktowa)	sondowania elektrooporowe BTS	Dobiński i inni (1996) Dobiński (1996; 1997; 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	–	–	–

cji i formie terenu oraz o opublikowanych rezultatach poszukiwań wieloletniej zmarzliny w tych miejscach zestawiono w tabeli 1.

Do pomiarów wykorzystano miniaturowe rejestratory temperatury wyposażone w termometry elektryczne (termistory) firmy Onset Hobo Pro, rejestrujące temperaturę w zakresie od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ z rozdzielczością $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$ i dokładnością $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Wszystkie urządzenia zainstalowano przed pierwszymi opadami śniegu. W okresie pomiarów termistory były przykryte 3-centymetrową warstwą gruzu jako osłoną przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym oraz w celu zapewnienia dobrego kontaktu z powierzchnią gruntu. Pomiary temperatury powierzchni gruntu w Miedzianej Kotlinie (MK) prowadzono od 23 VIII 2003 do 2 X 2004 r., w Koziej Dolince (KW, KP, KG1, KG2, KC1, KC2) od 1 IX 2003 do 30 VI 2005, a w Świstówce Rostockiej (SR) i Dolinie Pięciu Stawów Polskich (PK, PB, PS) od 30 IX 2003 do 29 VII 2005. Latem 2004 r. w Koziej Dolince założono stanowiska KC1 i KC2 i zlikwidowano stanowisko KG2. Temperaturę powierzchni gruntu rejestrowano co godzinę.

Do interpretacji uzyskanych danych wykorzystano wyniki pomiarów temperatury powietrza i grubości pokrywy śnieżnej (wartości dobowe) przy stacji Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN na Hali Gąsienicowej. Znajduje się ona na wysokości 1520 m n.p.m. w odległości około 3 km od Koziej Dolinki (ryc. 1).

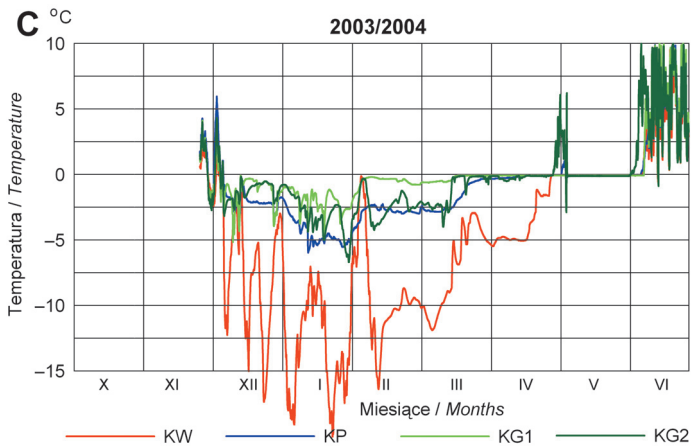
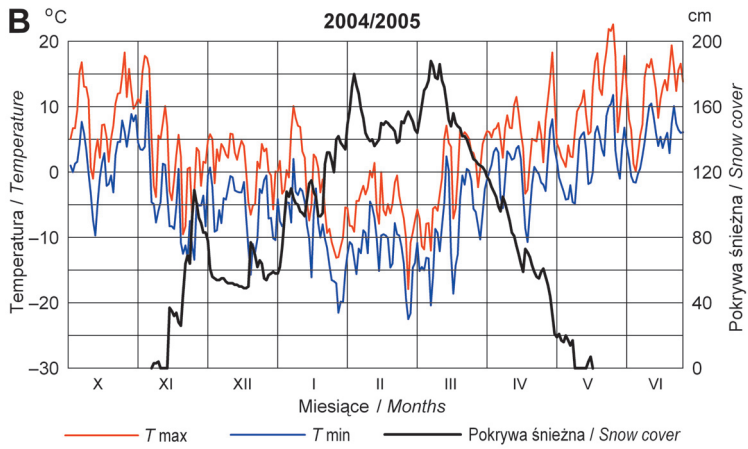
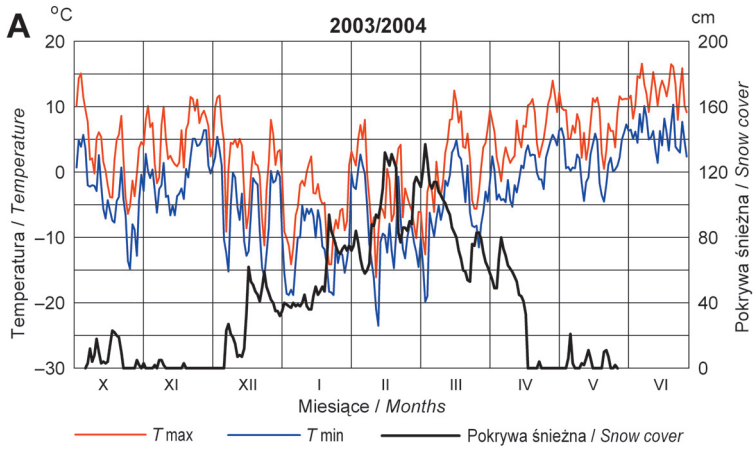
Wyniki i ich interpretacja

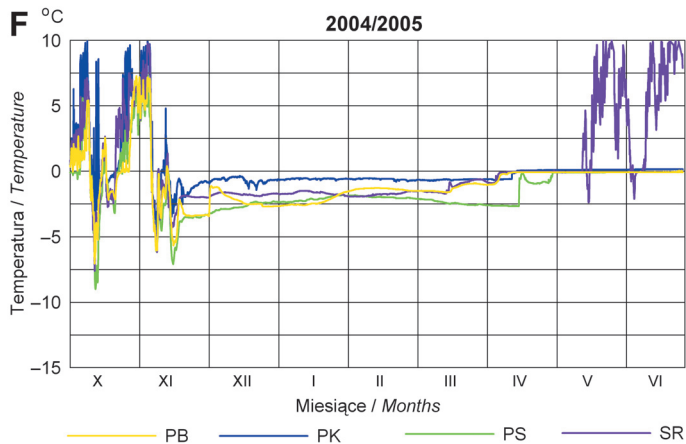
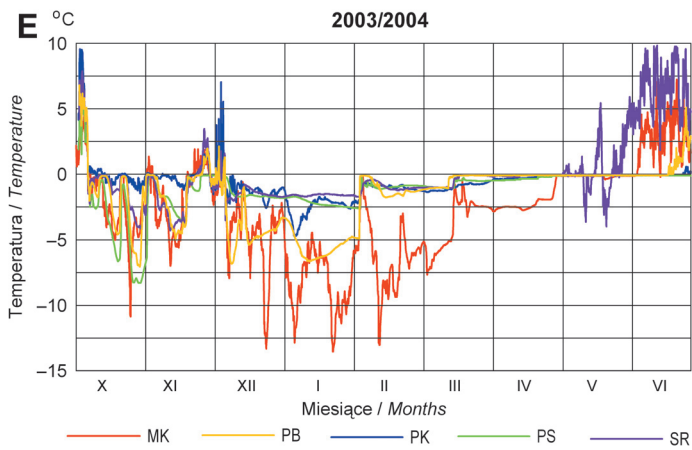
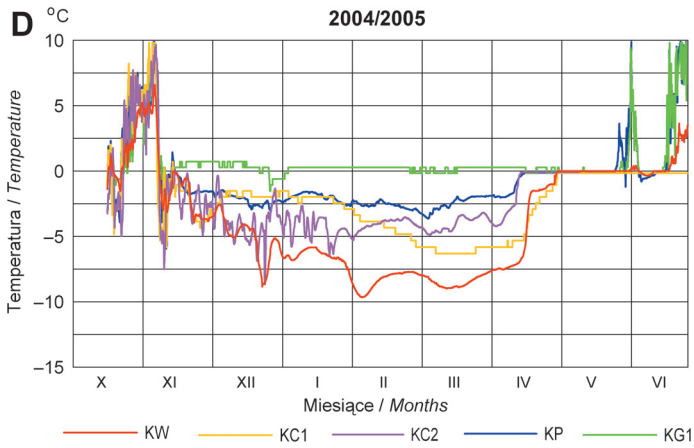
Zimowa zmienność temperatury powierzchni gruntu w miejscach występowania i braku współczesnej wieloletniej zmarzliny

Zarejestrowane na poszczególnych stanowiskach wartości temperatury powierzchni gruntu i powietrza oraz grubość pokrywy śnieżnej na Hali Gąsienicowej przedstawiono na rycinie 2. Średnia roczna temperatura powierzchni gruntu w miejscach występowania współczesnej wieloletniej zmarzliny była ujemna, a w pozostałych miejscach – dodatnia (tab. 2). Potwierdza to występowanie wieloletniej zmarzliny na stanowiskach MK, KW i KC1, ale nie ujawnia jej w miejscach, gdzie wcześniej wskazywano na możliwość istnienia reliktovej wieloletniej zmarzliny (SR, PB i PK).

Miejsca występowania współczesnej wieloletniej zmarzliny

Zmienność temperatury powierzchni gruntu na stanowiskach MK i KW świadczy o małej miąższości warstwy śniegu przez znaczną część zimy 2003/2004. Od momentu utworzenia się trwałej pokrywy śnieżnej (I dekada grudnia) do odwilży w dniach 5–7 lutego temperatura powierzchni gruntu zmieniła się od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ na wale morenowym w Miedzianej Kotlinie (MK) i od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ na stożku usypiskowym pod Kozim Wierchem (KW). Stopniowy wzrost grubości pokrywy śnieżnej sprzyjał stabilizacji temperatury jej podłoża.





Ryc. 2. Zmiany temperatury powietrza i miąższości pokrywy śnieżnej na Hali Gąsienicowej (A, B) oraz zmiany temperatury u spągu pokrywy śnieżnej w badanych miejscach (C, D, E, F)
 Changes in air temperature and snow cover thickness at Hala Gąsienicowa (A, B), and winter GST at the sites studied (C, D, E, F)

W pierwszej połowie marca temperatura powierzchni gruntu zmieniała się od $-5,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-7,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ na stanowisku MK i od $-9,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-11,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ na stanowisku KW. Jednak ocieplenia w drugiej połowie marca i związana z nimi perkolacja wód roztopowych w obu miejscach spowodowały szybkie podwyższenie temperatury u spągu pokrywy śnieżnej odpowiednio do $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $-3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. W kolejnym okresie trwającym do wiosennych roztopów (przełom kwietnia i maja) temperatura powierzchni gruntu na pierwszym stanowisku (MK) wynosiła około $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, a na drugim (KW) około $-5,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. W obu miejscach pokrywa śnieżna zanikła w pierwszej dekadzie czerwca.

W listopadzie 2004 r. szybki wzrost trwałej pokrywy śnieżnej na stanowiskach KW i KC1 sprzyjał wczesnej stabilizacji temperatury jej podłoża. Na stanowisku KW krótkookresowe wahania temperatury powierzchni gruntu (od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-8,0\text{ }^{\circ}\text{C}$) miały stosunkowo małą amplitudę i trwały do końca grudnia. W styczniu temperatura u spągu pokrywy śnieżnej wynosiła od $-6,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-7,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Natomiast w kolejnym okresie, trwającym aż do roztopów (trzecia dekada kwietnia), temperatura powierzchni gruntu była bliska $-8,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na stanowisku KC1, położonym we wklęsłej formie terenu, gruba pokrywa śnieżna przez całą zimę chroniła podłoże przed krótkookresowymi zmianami temperatury powietrza. Od początku grudnia do trzeciej dekady stycznia temperatura powierzchni gruntu wynosiła około $-2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, a później stopniowo zmalała do około $-6,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Wzrost temperatury u spągu pokrywy śnieżnej na tym stanowisku nastąpił dopiero w okresie kwietniowych roztopów.

Miejsca wolne od współczesnej wieloletniej zmarzliny

W okresie zimowym 2003/2004 tylko w Szpiglasowym Kotle (PS) i Świstówce Roztockiej (SR) temperatura u spągu pokrywy śnieżnej była stabilna przez cały czas jej trwania. Mogło to być związane z nawiewaniem i lawinową akumulacją śniegu. Na stanowisku PS, podczas dwu pierwszych miesięcy (XII, I), temperatura powierzchni gruntu powoli obniżała się z $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (zgodnie z trendem temperatury powietrza), natomiast na stanowisku SR była stała i wynosiła około $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. W pozostałych monitorowanych miejscach temperatura powierzchni gruntu odzwierciedlała wówczas zmiany temperatury powietrza z opóźnieniem proporcjonalnym do grubości i gęstości pokrywy śnieżnej. Najniższe wartości temperatury powierzchni gruntu wynosiły w tym okresie około $-7,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zarejestrowano je pod grubą pokrywą śnieżną, we wklęsłej formie terenu, na najniżej położonym stanowisku PB. Wskutek odwilży w dniach 5–7 lutego temperatura powierzchni gruntu na progu Koziej Dolinki (KP) wzrosła do $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, a na pozostałych stanowiskach do około $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na stanowisku KG1 taka temperatura utrzymała się już do końca zimy. W okresie kolejnych 6 tygodni temperatura powierzchni gruntu na stanowisku KP wynosiła około $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, na SR, PK, PB i PS była zbliżona do $-1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, a na KG2 zmieniała się od $-2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-4,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po odwilży w dniach 17–21 marca wszędzie wzrosła do $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Następnej zimy prawie we wszystkich monitorowanych miejscach temperatura spągu pokrywy śnieżnej była stabilna od trzeciej dekady listopada aż do roztopów w trzeciej dekadzie kwietnia. Na stanowiskach SR, PK i KG1 była stale bliska odpowiednio $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, na stanowisku PB bardzo powoli wzrastała od $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, a na KP obniżała się od $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. W Szpiglasowym Kotle (PS) temperatura powierzchni gruntu, po dwumiesięcznym okresie powolnego wzrostu od $-3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ do około $-2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, ponownie obniżyła się do $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jedynie na KC2, z powodu wywiewania i zsuwania się śniegu, pokrywa śnieżna narastała powoli i do końca stycznia nie chroniła podłoża przed krótkookresowymi zmianami temperatury powietrza; temperatura powierzchni gruntu wahała się wtedy od $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-8,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. W późniejszym okresie, który trwał aż do roztopów, amplitudy temperatury powierzchni gruntu w tym miejscu zmniejszyły się, a jej wielkość powoli wzrastała od $-5,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Typy reżimu termicznego powierzchni gruntu i ich związek z pokrywą śnieżną

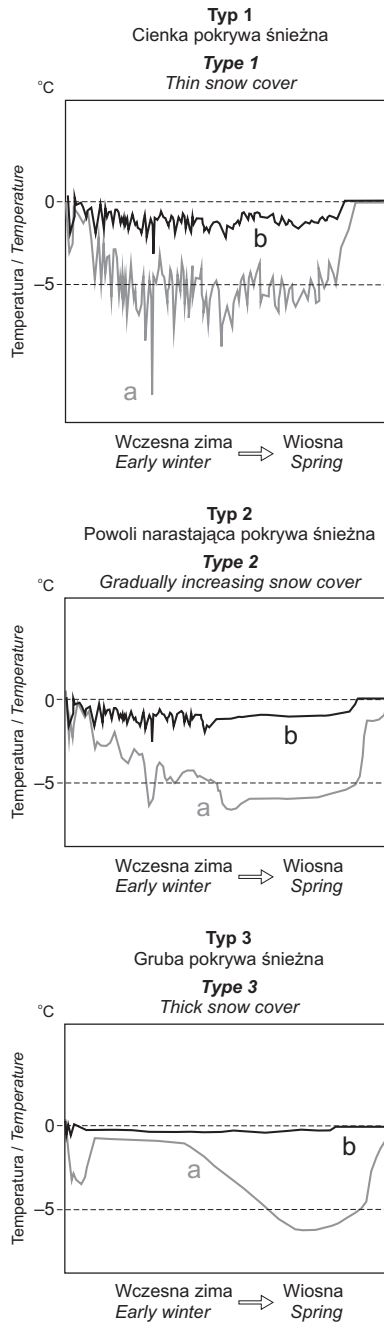
Przedstawione powyżej dane wskazują na trzy etapy zmienności temperatury powierzchni gruntu, zbieżne z rozwojem pokrywy śnieżnej:

- cienkiej pokrywy śnieżnej oraz krótkookresowych wahań temperatury jej podłoża;
- grubej pokrywy śnieżnej i stabilizacji temperatury jej podłoża;
- roztopów i szybkiego wzrostu temperatury pokrywy śnieżnej oraz jej podłoża.

Rodzaj, liczba i czas trwania powyższych stadiów na poszczególnych stanowiskach była zmienna. Zidentyfikowano trzy podstawowe typy zimowego reżimu termicznego powierzchni gruntu (ryc. 3; tab. 2).

1. Krótkookresowe zmiany temperatury powierzchni gruntu trwające przez całą zimę

Ten typ reżimu termicznego cechuje powierzchnie gruntów pod cienką pokrywą śnieżną. Utrzymuje się ona przez całą zimę zwykle w miejscach wywiewania lub zsuwania się śniegu. Temperatura powierzchni gruntu zmienia się wtedy wraz z temperaturą powietrza. Opóźnienie i amplituda tych zmian zależą od grubości i gęstości pokrywy śnieżnej. Podobny typ reżimu termicznego zarejestrowano na stanowiskach MK, KW i KG2 (zima 2003/2004) oraz KC2 (zima 2004/2005). W miejscach występowania wieloletniej zmarzliny – MK i KW najniższe wielkości temperatury powierzchni gruntu wynosiły odpowiednio $-13,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $-20,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, a na stanowiskach wolnych od wieloletniej zmarzliny – KG2 i KC2 – były bliskie odpowiednio $-4,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $-8,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na początku wiosny 2004 r. na wszystkich monitorowanych stanowiskach nastąpiła stabilizacja temperatury powierzchni gruntu. Zarejestrowano wówczas krótkotrwałe ochłodzenie i znaczne opady śniegu (ryc. 2).



Ryc. 3. Typy reżimu termicznego u spągu pokrywy śnieżnej w strefie występowania współczesnej wieloletniej zmarzliny (a) i miejscach wolnych od niej (b)

Types of thermal regime at the bottom of snow cover at sites of contemporary permafrost occurrence (a) or permafrost-free (b)

Tabela 2. Typy reżimu termicznego w spągu pokrywy śnieżnej, temperatura powierzchni gruntu przed wiosennymi roztopami oraz występowanie wieloletniej zmarzliny w miejscach pomiarowych

Types of thermal regime at the bottom of snow cover, GST values before spring thaws and the contemporary existence of permafrost at measurement sites

Stano- wisko	Typ zimowego reżimu termicznego powierzchni gruntu		Temperatura powierzchni gruntu w marcu (°C)		Średnia roczna temperatura powierzchni gruntu (°C)
	2003/2004	2004/2005	2003/2004	2004/2005	
MK	1	brak danych	-7,0 – 0,0	brak danych	-1,0
KW	1	2	-12,0 – -3,0	-8,0	-1,6
KC1	brak danych	3	brak danych	-6,0	brak danych
KC2	brak danych	1	brak danych	-5,0 – -2,5	brak danych
KG1	2	3	-0,5	0,0	2,3
KG2	1	brak danych	-4,0 – 0,0	brak danych	brak danych
KP	2	3	-3,0	-2,0	1,4
SR	2	3	-1,0	-1,0	1,9
PK	2	3	-1,0	-0,5	1,4
PB	2	3	-1,0	-1,5	0,3
PS	2	3	-1,0	-2,5	0,2

2. Krótkookresowe zmiany temperatury powierzchni gruntu tylko na początku zimy

Ten typ reżimu termicznego cechuje powierzchnie gruntów pod pokrywą śnieżną której miąższość stopniowo wzrasta. Czas trwania stadiów cienkiej pokrywy śnieżnej (krótkookresowe wahania temperatury powierzchni gruntu) oraz grubej pokrywy śnieżnej (stabilna temperatura powierzchni gruntu) zależy od lokalnych warunków topograficznych i meteorologicznych. Zimą 2003/2004 taką zmienność temperatury powierzchni gruntu zarejestrowano na stanowiskach KG1, KP, SR, PK, PB i PS, a rok później na KW. Pod koniec wskazanych okresów zimowych temperatura u spągu suchej pokrywy śnieżnej (BTS) na stanowiskach wolnych od współczesnej wieloletniej zmarzliny wynosiła od $-0,5$ °C (KG1) do $-3,0$ °C (KP), a w miejscu jej istnienia (KW) była bliska $-7,0$ °C. W miejscach SR, PK i PB, gdzie wcześniej wskazywano na prawdopodobne istnienie reliktywnej wieloletniej zmarzliny, temperatura powierzchni gruntu wynosiła $-1,0$ °C, jednak we wszystkich przypadkach tę temperaturę stabilizowała gruba pokrywa śnieżna. Szczególnie wyraźnie zostało to zarejestrowane w sezonie zimowym 2003/2004, kiedy stadium grubej pokrywy śnieżnej w monitorowanych miejscach rozpoczęło się w lutym, tuż po krótkotrwałej odwilży. Na wszystkich stanowiskach pokrywa śnieżna ustabilizowała tempe-

raturę powierzchni gruntu, gwałtownie podwyższoną w czasie roztopów. Ta ustabilizowana temperatura uległa szybkiej zmianie dopiero podczas kolejnych odwilży w trzeciej dekadzie marca, kiedy wszędzie wzrosła ostatecznie do 0 °C.

3. *Brak krótkookresowych zmian temperatury powierzchni gruntu przez cały okres zalegania suchej pokrywy śnieżnej*

Ten typ reżimu termicznego cechuje powierzchnie gruntów przykrytych od początku zimy grubą pokrywą śnieżną, chroniącą podłoże przed wpływem krótkookresowych zmian temperatury powietrza. Trwała pokrywa śnieżna o dużej miąższości tworzy się na początku sezonów zimowych zwykle w strefie nawiewania i lawinowej akumulacji śniegu. W sezonach bardzo śnieżnych i mroźnych powstaje także w innych miejscach, tam gdzie nie jest narażona na mechaniczną degradację (np. wywiewanie lub zsuwanie). Szczególnie sprzyjają jej wklęsłe formy terenu. Reżim termiczny typowy dla podłoża grubej pokrywy śnieżnej zarejestrowano w zimie 2004/2005 na stanowiskach KC1, KG1, KP, SR, PK, PB i PS, przebieg temperatury powierzchni gruntu na wskazanych stanowiskach był jednak zróżnicowany. Na KG1 (eksponowanym na południe) początkowa temperatura gruntu wynosiła 0 °C i utrzymała się do końca trwania pokrywy śnieżnej. Na stanowisku KP była ona w tym czasie zbliżona do -0,5 °C, przy czym pod koniec grudnia 2004 r. w obu tych miejscach zarejestrowano kilkudniowe obniżenie temperatury powierzchni gruntu do -1,0 °C, związane z osiadaniem pokrywy śnieżnej (zmniejszenie grubości i wzrost gęstości śniegu) i znacznym spadkiem temperatury powietrza. Na pozostałych stanowiskach zarejestrowano powolne zmiany temperatury powierzchni gruntu. Odzwierciedlały one okresowe trendy przebiegu temperatury powietrza z opóźnieniem stosownym do grubości i gęstości pokrywy śnieżnej. Największe zmiany tego typu zarejestrowano w miejscu występowania współczesnej wieloletniej zmarzliny (KC1), gdzie kilkumetrowa pokrywa śnieżna zalega kilka miesięcy. Po siedmioletniej stabilizacji temperatura pod grubą pokrywą śnieżną w ciągu sześciu tygodni obniżyła się o 4,0 °C. We wszystkich przypadkach miąższa pokrywa śnieżna stabilizowała początkowe wartości temperatury jej podłoża.

Dyskusja

Uzyskane dane świadczą, że miejsca zawierające wieloletnią zmarzlinę i wolne od niej mogą cechować się podobnym reżimem termicznym powierzchni gruntu oraz potwierdzają znaczną czasową zmianę temperatury spągu pokrywy śnieżnej (Brenning i inni, 2005). Miejsca ze współczesną wieloletnią zmarzliną (stanowiska: MK, KW i KC1) były jednak wyraźnie chłodniejsze od pozostałych. Pod koniec sezonów zimowych 2003/2004 i 2004/2005 temperatura u spągu grubej pokrywy śnieżnej (konwencjonalne BTS) nie była tam wyższa

niż $-5,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, podczas gdy w pozostałych miejscach najniższe wartości BTS wynosiły $-3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (tab. 2).

Typy zimowego reżimu termicznego powierzchni gruntu związane z cienką, stopniowo narastającą i grubą pokrywą śnieżną (ryc. 3), były analogiczne do tych, które M. Ishikawa (2003) stwierdził w górach Japonii. Jednak w przypadku powolnego obniżania się temperatury powierzchni gruntu aż do osiągnięcia minimum pod koniec zimy (stanowiska KC1 i PS), przyczyną nie była cyrkulacja powietrza pomiędzy blokami skalnymi i tworzenie się podpowierzchniowych mrozowisk w obniżeniach terenu (Ishikawa, 2003). Ten typ reżimu temperatury powierzchni gruntu zarejestrowano w miejscach z pokrywą gruzowo-piaszczystą – wklęsłym (KC1) i wypukłym (PS), a zimowe wartości temperatury gruntu na głębokości 50 cm były wyższe od wartości temperatury powierzchni gruntu (Gądek i Kędzia; materiały niepublikowane). Duża akumulacja śniegu w tych przypadkach uwarunkowana była odpowiednio kształtem terenu i zasilaniem lawinowym. Gradient przypowierzchniowej temperatury gruntu świadczył o przepływie ciepła do nadległych, zimniejszych warstw śniegu. Wyraźne wydłużanie się reakcji temperatury powierzchni gruntu na zmiany temperatury powietrza, zarejestrowane na sąsiadujących ze sobą stanowiskach z coraz grubszą pokrywą śnieżną KC2, KW i KC1 (ryc. 2D) świadczą, że w miejscach o małych zasobach ciepła w gruncie (KW i KC1), gruba i długo zalegająca pokrywa śnieżna spowalnia przepływ ciepła, ale nie chroni całkowicie podłoża przed wychładzającym wpływem atmosfery.

Notowana temperatura powierzchni gruntu wskazuje na współczesny rozwój wieloletniej zmarzliny wewnątrz niektórych stoków o ekspozycji północnej, zarówno pod grubą, jak i stopniowo narastającą lub cienką pokrywą śnieżną. Temperatura powierzchni gruntu na stanowiskach KW i KC1 była znacznie niższa niż na stanowisku PS, które cechowała podobna wysokość, ekspozycja i pokrywa śnieżna. Jednocześnie temperatura podłoża szybko narastającej pokrywy śnieżnej na stanowisku KW była znacznie niższa niż na sąsiednim KC2 (ryc. 2D), położonym 55 metrów wyżej i w miejscu wywiewania śniegu. Podpowierzchniowa cyrkulacja powietrza (Delaloye i Lambiel, 2005) pomiędzy tymi stanowiskami nie była możliwa, ponieważ stanowisko KC2 znajdowało się na wychodni skalnej. Zatem występowanie współczesnej zmarzliny w piętrze alpejskim Tatr może być bardziej związane z lokalną cyrkulacją zimnego powietrza nad powierzchnią gruntu niż z wysokością terenu i rozwojem pokrywy śnieżnej.

Na żadnym ze stanowisk w Dolinie Pięciu Stawów Polskich i Świstówce Roztockiej nie zarejestrowano niskich wartości BTS, pomimo że wyniki wcześniejszych badań elektrooporowych sugerowały istnienie wieloletniej zmarzliny na głębokościach od 0,5 do 3,0 m (Dobiński, 1997). Miejsca te znajdują się poniżej granicy występowania współczesnej wieloletniej zmarzliny w Tatrach, wyznaczonej na podstawie wskaźników tajania i zamrozu i dlatego były uznane

za stanowiska reliktovej wieloletniej zmarzliny (Dobiński, 2004). Ich podłoże zbudowane jest z granitoidowych głazów, pomiędzy którymi są wolne przestrzenie o oporności elektrycznej podobnej jak lodu. Rozwój współczesnej zmarzliny w tych miejscach w wyniku cyrkulacji zimnego powietrza w gruzowym stoku (m.in. Delaloye i Lambiel, 2005) nie znajduje odzwierciedlenia w zarejestrowanych temperaturach powierzchni gruntu. Brak jest też doniesień o tworzeniu się na tym obszarze kominów wentylacyjnych w pokrywie śnieżnej. Istnienie wieloletniej zmarzliny w tych miejscach powinno być zatem sprawdzone innymi metodami.

Wnioski

1. Reżim termiczny powierzchni gruntu u spodu pokrywy śnieżnej nie jest wskaźnikiem istnienia wieloletniej zmarzliny. W strefie występowania zmarzliny sporadycznej w piętrze alpejskim Tatr związany on jest przede wszystkim z rozwojem pokrywy śnieżnej w danym miejscu i może zmieniać się z roku na rok.
2. Pokrywa śnieżna w piętrze alpejskim Tatr zwykle nie chroni gruntu przed zamrażaniem, ale zależnie od swej grubości i gęstości oraz ilości ciepła zgromadzonego w gruncie zmniejsza amplitudy i wydłuża czas reakcji temperatury powierzchni gruntu na zmiany temperatury powietrza. Nawet w przypadku pokrywy śnieżnej o kilkumetrowej miąższości przez kilka miesięcy, możliwe jest powolne obniżanie się temperatury u jej spągu aż do osiągnięcia minimum pod koniec zimy.
3. Pomimo czasoprzestrzennej zmienności temperatura w spągu pokrywy śnieżnej w miejscach występowania współczesnej wieloletniej zmarzliny jest znacznie niższa niż w pozostałych miejscach. Interpretacja wyników kartowania wieloletniej zmarzliny metodą BTS, oparta na konwencjonalnych wartościach progowych, może jednak być zawodna.
4. Współczesna wieloletnia zmarzlina w piętrze alpejskim Tatr rozwija się zarówno pod cienką jak i pod grubą pokrywą śnieżną, a jej istnienie może być bardziej związane z ekspozycją i lokalną cyrkulacją zimnego powietrza nad powierzchnią niż z wysokością terenu i rozwojem pokrywy śnieżnej.

*

Autorzy serdecznie dziękują Profesorom Adamowi Kotarbie (IGiPZ PAN) i Jackowi Jani (Uniwersytet Śląski), Panu Markowi Kotlarczykowi (IMGW) oraz Dyrekcjom polskiego i słowackiego Tatrzańskiego Parku Narodowego za okazaną pomoc.

Piśmiennictwo

- Brenning A., Gruber S., Hoelzle M., 2005, *Sampling and statistical analyses of BTS measurements*, Permafrost and Periglacial Processes, 16, 4, s. 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, 2, s. 194–203.
- Dobiński W., 1996, *Wyniki pomiarów temperatury u spodu zimowej pokrywy śnieżnej – BTS – w Dolinie Pięciu Stawów Polskich i okolicy*, Geographia. Studia et Dissertationes, 20, s. 15–22.
- , 1997, *Warunki występowania zmarzliny w alpejskim piętrze Tatr Wysokich*. Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski, Sosnowiec, maszynopis.
- , 2004, *Wieloletnia zmarzlina w Tatrach: geneza, cechy, ewolucja*, Przegląd Geograficzny, 76, 3, s. 327–343.
- Dobiński W., Gądek B., Żogała B., 1996, *Wyniki geoelektrycznych badań osadów czwartorzędowych w piętrze alpejskim Tatr Wysokich*, Przegląd Geologiczny, 44, 3, s. 259–261.
- Gądek B., Kotyrba A., 2003, *Kopalny lód lodowcowy w Tatrach?*, Przegląd Geologiczny, 51, 7, s. 571.
- Gądek B., Żogała B., 2005, *Występowanie kopalnego lodu w Miedzianej Kotlinie (Tatry Wysokie w świetle danych elektrooporowych)*, [w:] A. Kotarba, K. Krzemień, J. Świąchowicz (red.), *VII Zjazd Geomorfologów Polskich, Współczesna ewolucja rzeźby Polski*, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ, Kraków, s. 555–560.
- 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.), *Tatrański Park Narodowy na tle innych górskich terenów chronionych, T. 1. Nauki o Ziemi, Materiały III Ogólnopolskiej Konferencji Przyroda Tatrańskiego Parku Narodowego a Człowiek*, PTPNoZ-TPN, Zakopane-Kraków, s. 100–108.
- Genxu W., Yuanshou L., Yibo W., Qingbo W., 2008, *Effects of permafrost thawing on vegetation and soil carbon pool losses on the Qinghai–Tibet Plateau, China*, Geoderma, 143, 1-2, s. 143–152.
- Gude M., Barsch D., 2005, *Assessment of geomorphic hazards in connection with permafrost occurrence in the Zugspitze area (Bavarian Alps, Germany)*, Geomorphology, 66, 1–4, s. 85–93.
- Haeberli 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, 1–2, s. 221–227.
- , 1978, *Special aspects of high mountain permafrost methodology and zonation in the Alps*, [w:] *Proceedings of the Third International Conference on Permafrost, Edmonton, Canada*, National Research Council of Canada, Ottawa, s. 378–384.
- Hinzman L.D., Kane D.L., Yoshikawa K., Carr A., Bolton W.R., Fraver M., 2003, *Hydrological variations among watersheds with varying degrees of permafrost*, [w:] *Proceedings of the VII International Permafrost Conference, Switzerland, July 21–25, 2003*, Taylor and Francis Group plc, London, s. 407–411.
- Hoelzle M., Haeberli W., Keller F., 1993, *Application of BTS measurements for modelling mountain permafrost distribution*, [w:] *Sixth International Conference on Permafrost. Proceedings*, 1, Beijing, China, s. 272–277, maszynopis powielony.

- Hoelzle 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, 2, s. 113–124.
- Ishikawa M., 2003, *Thermal regimes at the snow-ground interface and their implications for permafrost investigation*, *Geomorphology*, 52, 1–2, s. 105–120.
- Ishikawa M., Hirakawa K., 2000, *Mountain permafrost distribution based on BTS measurements and DC resistivity soundings in the Daisetsu Mountains, Hokkaido, Japan*, *Permafrost and Periglacial Processes*, 11, 2, s. 109–123.
- Jorgenson M.T., Racine C.H., Walters J.C., Osterkamp T.E., 2001, *Permafrost degradation and ecological changes associated with a warming climate in central Alaska*, *Climatic Change*, 48, 4, s. 551–571.
- Kędzia S., 2004, *Klimatyczne i topograficzne uwarunkowania występowania wieloletniej zmarzliny w Tatrach Wysokich (na przykładzie Koziej Dolinki)*, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN, Kraków, maszynopis.
- Kędzia S., Mościcki J., Wróbel A., 1998, *Studies on the occurrence of permafrost in Kozia Valley (The High Tatra Mts.)*, [w:] J. Repelewska-Pękalowa (red.), *Relief, Quaternery Paleogeography and Changes of the Polar Environment. Polar Session*, Uniwersytet Marii Curie-Słodowskiej, Lublin, s. 51–57.
- Lamparski P., Kędzia S., 2007, *Permafrost occurrence in Kozia Dolinka (High Tatra Mountains) in light of georadar investigations*, *Geomorphologia Slovaca*, 7, 1, s. 82–88.
- 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, 1, s. 67–80.
- Mościcki J., Kędzia S., 2001, *Investigation of mountain permafrost in the Kozia Dolinka valley, Tatra Mountains, Poland*, *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 55, 4, s. 235–240.
- Philips M., Schweizer J., 2007, *Effect of mountain permafrost on snowpack stability*, *Cold Regions Science and Technology*, 47, 1–2, s. 43–49.
- Salzmann N., Nötzli J., Hauck C., Gruber S., Hölzle M., Haeberli W., 2007, *Ground surface temperature scenarios in complex high-mountain topography based on regional climate model results*, *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 112, s. F02S12.

[Wpłynęło: lipiec 2008; poprawiono: styczeń 2009 r.]

BOGDAN GADEK, STANISŁAW KĘDZIA

THE PROBLEM OF PERMAFROST DETECTION BASED ON
BOTTOM TEMPERATURE SNOW COVER –
THE TATRA MTS. CASE

This paper presents the results of winter monitoring of ground surface temperature in the alpine zone of the Tatra Mountains, at sites where earlier studies had documented the presence or absence of permafrost. This made it possible to test the usefulness of the BTS method in permafrost mapping, and to take up the discussion on possibilities for its contemporary development. The data obtained reveal that the thermal regime of ground surface beneath snow cover cannot serve as an indicator of permafrost occurrence. The

regime is first and foremost connected with snow cover development and may change from year to year. Both places of permafrost occurrence and permafrost-free sites may feature three basic types of ground surface winter thermal regimes, i.e.: (1) short-term ground-surface temperature (i.e. GST) fluctuations throughout the winter, (2) short-term GST fluctuations at the beginning of winter only, and (3) a lack of short-term GST fluctuation during the whole period of occurrence of dry snow cover. However, places contemporarily maintaining permafrost were markedly colder than others. At the end of winters 2003/04 and 2004/05, temperatures beneath thick snow cover (conventional BTS) were no higher than -5°C , as compared with lowest BTS values of -3°C where permafrost was absent. Snow cover did not protect the ground from freezing, however, according to its thickness and density and the amount of heat in the ground there were decreased amplitudes and extended reaction times of GST to changes in air temperature. Even in the case of snow cover remaining several meters thick for several months, it was possible to record a slow decrease in bottom temperature until a minimum value was reached at the end of winter. In the light of the obtained data, contemporary permafrost in the alpine zone of the Tatra Mountains can be said to develop under both thick and thin snow cover, its existence therefore probably being more related to local circulation of cold air over the surface and low solar irradiation than to altitude and snow cover development.