

Zarys historii badań przemarzania gruntu i wieloletniej zmarzliny w polskiej części Tatr

*An outline of the history of ground freezing and permafrost research
in the Polish Tatra Mountains*

STANISŁAW KĘDZIA

Institut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. Stanisława Leszczyckiego PAN
31-018 Kraków, ul. św. Jana 22; kedia@zg.pan.krakow.pl

Zarys treści. Badania nad przemarzaniem gruntu i wieloletnią zmarzliną w Tatrach prowadzone są od około 70 lat. Pierwsze prace dotyczyły występowania gruntów strukturalnych i pomiarów głębokości przemarzania gruntu. W latach 1990. rozpoczął się nowy etap badań z zastosowaniem nowoczesnych metod geofizycznych i klimatologicznych, których głównym celem była detekcja wieloletniej zmarzliny i określenie jej klimatycznych i topograficznych uwarunkowań. W artykule omówiono najważniejsze wyniki badań nad przemarzaniem gruntu i wieloletnią zmarzliną w polskiej części Tatr.

Słowa kluczowe: wieloletnia zmarzlina, przemarzanie gruntu, Tatry.

Wstęp

Całoroczne występowanie lodu w niektórych jaskiniach w polskiej części Tatr, będące jedną z form zlodowacenia podziemnego, znane jest od dawna i stanowi przedmiot wielu badań (Siarzewski, 1996). Jednakże badania dotyczące występowania innych form wieloletniej zmarzliny zostały zapoczątkowane znacznie później. Poprzedzały je badania A. Jahna (1950, 1958, 1970) nad formami peryglacialnymi. Wiązał on ich występowanie ze zlodowaceniem plejstoceniowym oraz współczesnym, sezonowym przemarzaniem gruntu, a w niektórych przypadkach z dużą zawartością minerałów ilastych. Dalsze badania nad gruntami strukturalnymi były prowadzone przez M. Pulińską oraz M.Z. Pulinową (Pulina, 1968; Pulinowa i Pulina, 1972) i dotyczyły form powstałych w Jaskini Czarnej w Tatrach Zachodnich. Z kolei K. Oleksynowa oraz S. Skiba badali geochemizm gleb kriogenicznych na Przełęczy Krzyżnej w Tatrach Wysokich (Oleksynowa i Skiba, 1976,

1977). Badania związane z instrumentalnym pomiarem temperatury gruntu i głębokością jego przemarzania zapoczątkowane zostały w latach 1950. przez M. i M. Kłapów, M. Hessa oraz T. Gerlacha (Hess, 1963; Kłapa, 1963, 1966; Gerlach, 1971). Polegały one na pomiarach temperatury gruntu na różnych głębokościach za pomocą termometrów kolankowych i wyciągowych. Stosowano również zmarzlinomierze Danilina, służące do określania głębokości zamarzania i odmarzania gruntu. Oprócz pomiarów dotyczących przemarzania gruntu prowadzono także obserwacje ruchów gleby, wywołanych zjawiskami mrozowymi.

Nowoczesne metody badania wieloletniej zmarzliny w Tatrach przy użyciu zaawansowanego technologicznego sprzętu geofizycznego rozpoczęto dopiero w pierwszej połowie lat 1990. Zastosowanie nowoczesnych metod geofizycznych (elektrooporowej, sejsmiki refrakcyjnej) i analiz klimatycznych (BTS – *ang. bottom temperature of snow*, czyli pomiar temperatury w spągu zimowej pokrywy śnieżnej oraz wskaźnik tajania i zamarzania wg S.A. Harrisa) było w polskich górach podejściem nowatorskim i dało wiele interesujących wyników (Dobiński, 1996a, b, c, 1997a, b, 1998a, b; Dobiński i inni, 1996a, b; Dec i Dobiński, 1997, 1998). W następnych latach poszukiwania wieloletniej zmarzliny w polskiej części Tatr zostały poszerzone o nowe metody z zastosowaniem nowoczesnego sprzętu: pirometru, kamery termowizyjnej, georadaru (Kędzia i inni, 1998; Mościcki i Kędzia, 2001, 2002; Kędzia, 2004; Lamparski i Kędzia, 2007; Gądek i inni, 2013). Po stwierdzeniu występowania wieloletniej zmarzliny w Tatrach zwrócono uwagę na ewentualne związane z tym problemy inżynierskie i bezpieczeństwo turystów. Podczas modernizacji kolejki na Kasprowy Wierch zostały przeprowadzone pod tym kątem specjalistyczne badania geofizyczne (Gryczmański i inni, 2004). Wprawdzie w 1986 r. T. Czudek pisał o możliwości przetrwania w Tatrach do obecnych czasów plejstocenijskiej zmarzliny, jednakże nie przedstawił żadnych wyników z badań terenowych w Tatrach, dokumentujących występowanie nie tylko reliktovej, ale również współczesnej zmarzliny. W polskiej literaturze przeważał pogląd, że dopiero od wysokości około 2200 m n.p.m. istnieją sprzyjające warunki klimatyczne do występowania wieloletniej zmarzliny (np. Kotarba, 1988).

Dotychczas w badaniach nad wieloletnią zmarzliną w polskiej części Tatr zastosowano następujące metody:

- pomiary temperatury gruntu (pomiar temperatury powierzchni gruntu pod pokrywą śnieżną, rozkład temperatury w gruncie, pomiar głębokości zamarzania i rozmarzania gruntu za pomocą zmarzlinomierzy Danilina, pomiary temperatury gruntu za pomocą pirometru i kamery termowizyjnej),
- wskaźniki tajania i zamrozu według Harrisa,
- pomiar temperatury wody w potoku odwadniającym obszar z wieloletnią zmarzliną,
- punktowe sondowania elektrooporowe,
- sondowania obrazowe elektrooporowe (tomografia elektrooporowa),

- sondowania elektromagnetyczne,
- sondowania sejsmiczne,
- sondowania georadarowe,
- pomiar ruchu lodowców gruzowych i stożków piargowych.

Pomiary temperatury gruntu

Badania dotyczące temperatury i głębokości przemarzania gruntu w polskiej części Tatr zostały zapoczątkowane w latach 1960. przez M. i M. Kłapów, M. Hessa oraz T. Gerlacha (Hess, 1963; Kłapa, 1963, 1966; Gerlach, 1971). M. Hess wraz ze studentami prowadził pomiary temperatury gruntu wokół płatów śnieżnych w Koziej Dolince. M. i M. Kłapowie wraz z T. Gerlachem zajmowali się między innymi temperaturą gruntu i zjawiskami mrozowymi. Jesienią 1959 r. zamontowali w gruncie na stacji Instytutu Geografii Polskiej Akademii Nauk na Hali Gąsienicowej (1520 m n.p.m.) oraz na Karczmisku (1620 m n.p.m.) zmarzlinomierze typu Danilina. W następnych latach T. Gerlach i M. Kłapa zamontowali zmarzlinomierze w Koziej Dolince (1938 m n.p.m.), Przełęczy Krzyżne (2120 m n.p.m.) oraz Przełęczy Liliowe (1930 m n.p.m.). Niestety, żadne ówczesne pomiary nie potwierdziły występowania wieloletniej zmarzliny, dopiero w późniejszym okresie potwierdzono jej występowanie, na przykład w Koziej Dolince.

W 1994 r. do poszukiwań wieloletniej zmarzliny W. Dobiński zastosował bardzo prostą i popularną w krajach alpejskich oraz Górach Skandynawskich metodę BTS (Dobiński, 1996a, b, c, 1997a). W polskich górach była to nowość. W. Dobiński posłużył się tą metodą w Dolinie Pięciu Stawów Polskich (na progu Czarnego Stawu, Dolince pod Kołem, Świstówce Rostockiej) oraz w wybranych miejscach Doliny Gąsienicowej (na Hali Gąsienicowej, w dnie zachodniej części Doliny Gąsienicowej, górnej części Kotła Gąsienicowego, Dolince Suchej Stawiańskiej, pod Małym Kościelcem oraz na grani od szczytu Kasprowego Wierchu po Beskid). Łącznie wykonał 320 pomiarów, najniższą temperaturę wynoszącą około -5°C otrzymał po północnej stronie kopuły szczytowej Kasprowego Wierchu, w Dolince oraz Kotle pod Miedzianym Kosturem w Dolinie Pięciu Stawów Polskich. Według W. Dobińskiego wyniki uzyskane tą metodą świadczą o możliwości występowania zmarzliny już od wysokości 1650 m n.p.m., zarówno w Dolinie Gąsienicowej, jak i w Dolinie Pięciu Stawów Polskich.

W sierpniu 1995 r. badania nad występowaniem wieloletniej zmarzliny za pomocą pomiaru temperatury powierzchni gruntu rozpoczęli J. Mościcki oraz S. Kędzia (Kędzia, 2004). Na obszar badań wybrali Kozią Dolinkę, która obecnie jest najlepiej przebadanym pod kątem występowania wieloletniej zmarzliny terenem w polskiej części Tatr (fot. 1). Pierwsze pomiary zostały wykonane techniką podczerwieni przy użyciu pirometru geologicznego. Niestety, ze względu na duże zróżnicowanie badanej powierzchni (murawy wysokogórskie, głązy i drobny materiał) otrzymane dane pomiarowe trudno było jednoznacznie zinterpretować.

tować pod kątem występowania bądź braku wieloletniej zmarzliny. Przy współpracy z A. Wróbel w połowie września 1997 r. pomiary powtórzone przy użyciu kamery termowizyjnej. Termogram (obraz z kamery termowizyjnej) obejmujący część dna dolinki oraz piargowe stoki o ekspozycji N pod Kozim Wierchem i Kozimi Czubami, wykazał duże zróżnicowanie temperatury pomiędzy dolnymi a górnymi częściami piargów. Dolne części piargów były o około 7°C chłodniejsze od górnych części (Kędzia i inni, 1998). Rozkład temperatury zarejestrowany przez kamerę termowizyjną odpowiadał rozkładowi temperatury zmierzonemu



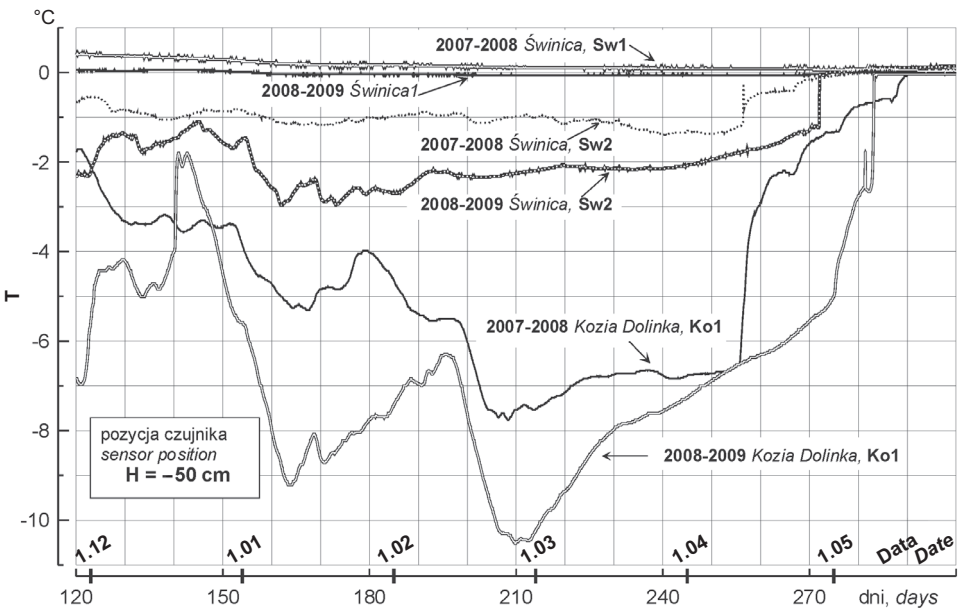
Fot. 1. Kozia Dolinka
The Kozia Dolinka Valley (fot./photo by S. Kędzia)

przez J. Mościckiego i S. Kędzię w kwietniu 1996 r. metodą BTS. W dolnej części piargu pod Kozim Wierchem zarejestrowano $-9,6^{\circ}\text{C}$, natomiast w górnej części $-0,2^{\circ}\text{C}$. Analogiczny rozkład temperatury zanotowano w 1997 r., wówczas temperatura spągu pokrywy śnieżnej w dolnej części piargu pod koniec zimy oscylowała wokół wartości $-8,0^{\circ}\text{C}$ (Kędzia i inni, 1998; Kędzia i Mościcki, 2000; Mościcki i Kędzia, 2001, 2002; Kędzia, 2004). Tak niskie wartości BTS, odwrócony rozkład temperatury (dolne części piargów zimniejsze niż górne) oraz duże różnice temperatury pomiędzy dolną a górną częścią piargów, zarówno w lecie jak i w zimie, według S. Kędzi dowodzą istnienia wieloletniej zmarzliny w Koziej Dolince. Na podstawie wartości BTS oraz wzoru opracowanego przez Haerber-

liego i Patzelt (Haeberli i Patzelt, 1982) oszacował on, że najmniejsza grubość warstwy czynnej w dolnej części piargu pod Kozim Wierchem wynosiła w badanym okresie około 1 m (Kędzia, 2004).

W latach 1997-1999 oraz 2003-2005 S. Kędzia prowadził w wybranych miejscach Koziej Dolinki dalsze pomiary temperatury u spągu pokrywy śnieżnej oraz w gruncie na głębokości 50 cm (Baranowski i inni, 2004, 2005; Kędzia, 2004, 2006; Gądek i Kędzia, 2006, 2007, 2008). W pierwszych latach badań były to patrolowe pomiary temperatury gruntu, w następnych, aż do chwili obecnej, wykorzystuje się cyfrowe rejestratory z termometrami termistorowymi.

W 2004 r. W.J. Mościcki (2008, 2010) rozpoczął pomiary temperatury powietrza i gruntu w Zadnim Kole pod Świnicą, nieco powyżej ostatniej moreny recesyjnej oraz w Koziej Dolince, w dolnej części stożka piargowego pod Kozim Wierchem. Pomiary temperatury gruntu w obu dolinkach były prowadzone na powierzchni gruntu oraz na głębokości 20 i 50 cm. Mimo że obie dolinki są usytuowane na podobnej wysokości (stanowiska pomiarowe w obu dolinkach znajdowały się w przedziale wysokości 1950-2000 m n.p.m.) i podobnie zacienione, wyniki pomiarów potwierdziły występowanie wieloletniej zmarzliny w Koziej Dolince i raczej wykluczyły – w Zadnim Kole (ryc. 1). Średnia temperatura gruntu na głębokości 50 cm w Koziej Dolince obliczona za okres



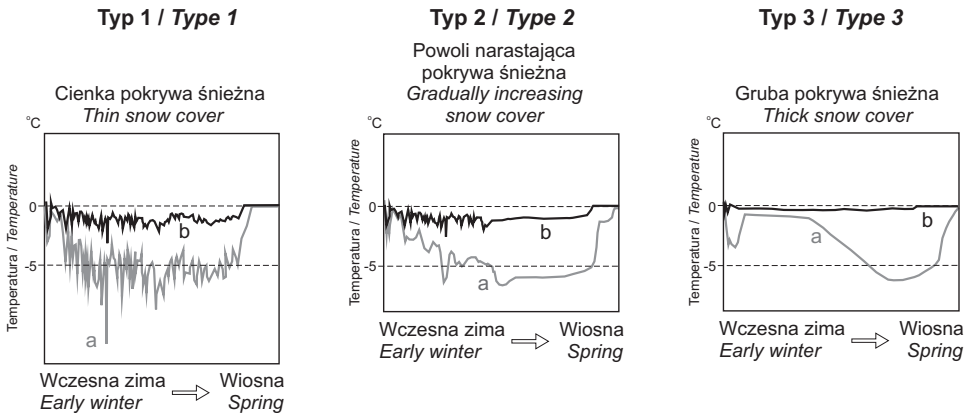
Ryc. 1. Przebieg temperatury gruntu na głębokości 50 cm w Koziej Dolince i pod Świnicą w okresie zimy i wiosny w latach 2007-2008 oraz 2008-2009 (Mościcki, 2010)

The courses for ground temperatures at a depth of 50 cm in the Kozia Dolinka Valley and below the Świnica peak in the winter and spring of 2007-2008 and 2008-2009 (Mościcki, 2010)

19.08.2007-30.08.2009 wynosiła $-1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, natomiast w Zadnim Kole pod Świnicą $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Mościcki, 2008, 2010). Pomiary te są kontynuowane.

Wszystkie dotychczasowe pomiary BTS w Koziej Dolince potwierdzają występowanie w niej wieloletniej zmarzliny na wysokości około 1950-2000 m n.p.m., na zacienionych, piargowych stokach Koziego Wierchu i Kozich Czub. Zmierzone wartości temperatury u spągu zimowej pokrywy śnieżnej należą do najniższych, jakie do tej pory zarejestrowano w polskiej części Tatr (Kędzia, 2004).

W 2003 roku B. Gądek rozpoczął ciągłe pomiary temperatury spągu pokrywy śnieżnej w Dolinie Pięciu Stawów Polskich oraz Miedzianej Kotlinie w słowackiej części Tatr (Gądek i Kędzia, 2008, 2009). Na podstawie pomiarów B. Gądka prowadzonych na 5 stanowiskach oraz pomiarów S. Kędzi na 6 stanowiskach w Koziej Dolince, został opracowany zimowy reżim termiczny powierzchni gruntu. W odniesieniu do miejsc zarówno ze zmarzliną, jak i wolnych od niej, wyróżniono po trzy typy reżimu termicznego zależnego od grubości i tempa narastania pokrywy śnieżnej (ryc. 2). Autorzy między innymi stwierdzili, że reżim termiczny powierzchni gruntu w spągu pokrywy śnieżnej nie jest wskaźnikiem występowania wieloletniej zmarzliny. Jest on związany głównie z rozwojem pokrywy śnieżnej i może się zmieniać z roku na rok. Współczesna wieloletnia zmarzlina w piętrze alpejskim Tatr rozwija się zarówno pod cienką, jak i grubą pokrywą śnieżną, natomiast interpretacja kartowania wieloletniej zmarzliny metodą BTS z zastosowaniem konwencjonalnych wartości progowych może być zawodna (Gądek i Kędzia, 2008, 2009).



Ryc. 2. Typy reżimu termicznego zarejestrowane u spągu pokrywy śnieżnej w miejscach występowania współczesnej wieloletniej zmarzliny (a) i w miejscach wolnych od niej (b) (Gądek i Kędzia, 2008, 2009)

The types of thermal regime for ground recorded at the bottom of the snow cover at sites where permafrost is found today (a) and where it does not occur (b) (Gądek and Kędzia, 2008, 2009)

Rok później B. Gądek i J. Leszkiewicz (2010) podjęli próbę określenia przestrzennych relacji pomiędzy temperaturą powietrza i grubością pokrywy śnieżnej a temperaturą powierzchni gruntu w miejscach o różnych uwarunkowaniach topograficznych. Stwierdzili między innymi, że temperatura u spodu suchej pokrywy śnieżnej związana jest z temperaturą powietrza w okresie poprzedzającym pomiar oraz zasobami ciepła w gruncie. Ci sami autorzy w 2012 r. omówili wpływ ocieplania się klimatu na temperaturę powierzchni gruntu w strefie występowania wieloletniej zmarzliny w Tatrach. Posługując się modelami statystycznymi stwierdzili, że wrażliwość termiczna powierzchni stoków gruzowych na ocieplenie klimatu jest tym mniejsza, im większe jest zacienienie, wysokość bezwzględna terenu oraz grubość pokrywy śnieżnej. Wykazali także, że w szczególnych warunkach orograficzno-niwalnych, wzrostowi średniej rocznej temperatury powietrza może paradoksalnie towarzyszyć spadek średniej rocznej temperatury powierzchni gruntu.

W 2012 r. B. Gądek przedstawił pierwsze wyniki obserwacji przejawów wentylacji gruzowych stoków w peryglacjalnej strefie Tatr. Autor określił geomorfologiczno-klimatyczne uwarunkowania wentylacji pokryw gruzowych – także w obrębie stoków usypiskowych zawierających wieloletnią zmarzlinę. Stwierdził, że jest to zjawisko powszechne i występuje w różnych okresach roku.

W.J. Mościcki wraz z S. Kędzia założyli w 1996 r. na stacji Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN na Hali Gąsienicowej (1520 m n.p.m.) stanowiska do pomiaru termometrami elektrycznymi (termistorami) temperatury powierzchni gruntu oraz na głębokości 5 cm, 20 cm, 50 cm i 100 cm. W odróżnieniu od poletek do pomiarów temperatury gruntu stosowanych przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, grunt, w którym zainstalowano termistory był naturalnie porośnięty murawą wysokogórską i ziołoroślami. Zastosowanie termometrów elektrycznych pozwalało na odczyt temperatury bez naruszania pokrywy śnieżnej. Pomiaru te wykazały, że naturalnie porośnięty grunt z nienaruszoną podczas pomiarów pokrywą śnieżną przemarza płycej i jest zamrożony znacznie krócej niż grunt pozbawiony pokrywy roślinnej i z naruszoną podczas pomiarów pokrywą śnieżną. Grunt na głębokości 50 cm zamarza tylko na około trzy miesiące, natomiast na głębokości 100 cm w ogóle nie przemarza (przynajmniej w czasie prowadzenia obserwacji). Pomiaru te są w ograniczonym zakresie nadal prowadzone.

W 2001 r. J. Baranowski wraz z Z. Rączkowską, rozpoczynając pomiary przemierzania pokryw zwietrzelinowych, zaczęli prowadzić automatyczny pomiar temperatury w gruncie (5 cm, 25 cm, 50 cm) w przedziale wysokości 1650-1860 w górnej części Doliny Goryczkowej Świńskiej (Baranowski i inni, 2004, 2005). Badania te były prowadzone przez okres 3 lat. Rozkład pionowy temperatury w gruncie zaprzeczył występowaniu współczesnej wieloletniej zmarzliny, mimo że wartości temperatury na głębokości 5 cm, czyli zbliżonej do BTS, oscylowały wokół $-2,0^{\circ}\text{C}$.

Wskaźniki tajania i zamrozu według Harrisa

Analiza wskaźników tajania i zamrozu według metody S. A. Harissa (1981) została zastosowana po raz pierwszy dla Tatr przez W. Dobińskiego (1997a,b, 2006). Na podstawie danych ze stacji meteorologicznych na Łomnicy, Kasprowym Wierchu, Skalnatym Plesie, w Dolinie Pięciu Stawów Polskich, na Hali Gąsienicowej i przy Morskim Oku obliczył potencjalne warunki występowania wieloletniej zmarzliny. Z obliczeń W. Dobińskiego wynika, że jedynie powyżej 1900 m n.p.m. istnieją odpowiednie warunki do występowania zmarzliny. Ponieważ w założeniach tej metody grubość pokrywy śnieżnej nie może przekraczać 0,5 m, dogodny obszar do występowania wieloletniej zmarzliny według tej metody ogranicza się do szczytów, grani i skalnych ścian.

Pomiar temperatury wody

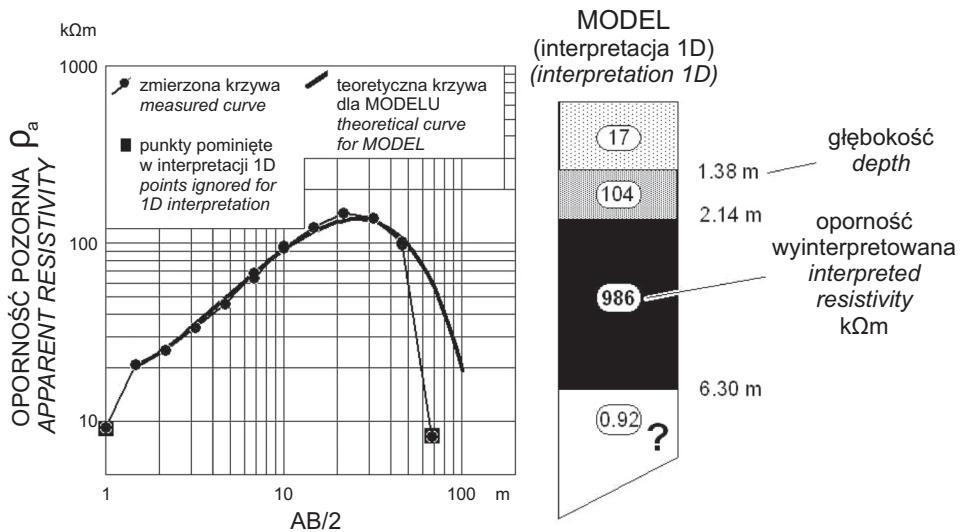
S. Kędzia oprócz pomiarów temperatury gruntu prowadził również patrolowe pomiary temperatury wody. Pomiary te były prowadzone w ciepłym okresie roku w latach 1998-2001, tuż poniżej skalnego rygla u wylotu Koziej Dolinki. Zarejestrowane wartości temperatury w okresach bezopadowych zawierały się w przedziale 0,0-0,5 °C. Taka wartość temperatury nie zaprzecza istnieniu wieloletniej zmarzliny (Haerberli, 1985), ale również nie potwierdza jej występowania, ponieważ odpowiada ona średnim rocznym wartościom temperatury powietrza na tej wysokości (Kędzia, 2004). Wyniki te dowodzą, że mierzenie temperatury wody wypływającej z obszaru o średniej rocznej temperaturze zbliżonej do 0°C lub niższej od 0°C, jest mało zasadne.

Punktowe sondowania elektrooporowe

Pierwsze sondowania elektrooporowe pod kątem badania wieloletniej zmarzliny w polskiej części Tatr przeprowadził W. Dobiński wraz z zespołem geofizyków z Uniwersytetu Śląskiego w dolinach Pięciu Stawów Polskich, Buczynowej oraz w obrębie kopuły szczytowej Kasprowego Wierchu. Stwierdzono występowanie w alpejskim piętrze Tatr Wysokich wysokooporowej warstwy, która została zinterpretowana jako wieloletnia zmarzlina. Jako wartość graniczną od której zaczyna się wieloletnia zmarzlina, przyjęto oporność 50 kΩm (Dobiński 1997a).

Sondowaniami elektrooporowymi posłużyli się również W.J. Mościcki ze S. Kędzią – do badania wieloletniej zmarzliny w Koziej Dolince. Pierwsze pomiary przeprowadzili w połowie września 1997 r. na stożku piargowym pod Kozim Wierchem oraz w dnie dolinki. W pobliżu miejsca gdzie wartości BTS były najniższe, wyniki sondowań w postaci wyinterpretowanych modeli (ryc. 3) wskazują na istnienie zamrożonej warstwy o grubości około 4 m. Ponad nią wystę-

puje warstwa czynna o grubości około 2 m. W 1999 r. przeprowadzono kolejne sondowania elektrooporowe na wymienionym stożku piargowym – pod koniec czerwca i na początku października – w celu prześledzenia zmian grubości warstwy czynnej i warstwy zamrożonej. Z wyinterpretowanych modeli wynika, że warstwa przemarznięta najintensywniej nadtapia się od dołu wskutek dużej ilości ciepła przekazywanego przez wodę, spływającą po skalnym podłożu kotła polodowcowego (Kędzia i in., 1998; Kędzia i Mościcki, 2000; Mościcki i Kędzia, 2000, 2001, 2002; Kędzia, 2004).



Ryc. 3. Krzywa sondowania elektrooporowego przeprowadzonego 18.09.1997 r. na stożku usypiskowo-obrywowym pod Kozim Wierchem wraz z modelem interpretacyjnym (Kędzia i inni, 1998)

Curve for electrical resistivity soundings conducted on 18 September 1997 on the debris-rockfall cone below the Kozi Wierch peak, along with an interpretative model (Kędzia *et al.*, 1998)

W 2007 r. W.J. Mościcki przeprowadził sondowania elektrooporowe w Zadnim Kole pod Świnicą, które nie potwierdziło występowania wieloletniej zmarzliny w badanym miejscu (Mościcki, 2011).

W celu potwierdzenia wyników badań terenowych W.J. Mościcki oraz S. Kędzia przeprowadzili eksperyment laboratoryjny, polegający na pomiarze oporności elektrycznej drobnych okruszków granitu zanurzonych w wodzie i poddanych powolnemu zamarzaniu. Eksperyment ten wykazał, że po zamarznięciu oporność próbki wzrosła skokowo, osiągając nawet kilkaset razy większe wartości w porównaniu z wartością początkową (Mościcki i Kędzia, 2000, 2001).

Tomografia elektrooporowa

Sondowanie gruntu z zastosowaniem tomografii elektrooporowej zostało zastosowane przez W. Dobińskiego w części szczytowej i na stokach Kasprowego Wierchu oraz w okolicy Myślenickich Turni (Dobiński i inni, 2008; Dobiński, 2011). W pobliżu szczytu wysokooporowe warstwy o układzie horyzontalnym W. Dobiński zinterpretował jako warstwy wieloletniej zmarzliny współczesnej, natomiast głębiej zalegające warstwy mogą, jego zdaniem, pochodzić z plejstoce-
nu (Dobiński, 2004a, b).

Sondowania elektromagnetyczne

Sondowania elektromagnetyczne, podobnie jak metoda tomografii elektrooporowej, zostały zastosowane przez W. Dobińskiego na Kasprowym Wierchu. Zarówno płytkie, jak i głębokie (do 60 m) sondowania, wykazały istnienie dwóch warstw o niskiej wartości przewodności elektromagnetycznej, które według W. Dobińskiego odpowiadają warstwom wieloletniej zmarzliny zinterpretowanymi przy użyciu tomografii elektrooporowej (Dobiński, 2011).

Sondowania sejsmiczne

Kolejną metodą zastosowaną przez W. Dobińskiego były sondowania sejsmiczne przeprowadzone wraz z geofizykami z Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie na Grubym Piargu w Dolinie Pięciu Stawów Polskich na wysokości około 1800 m n.p.m. Wyniki sugerują występowanie wieloletniej zmarzliny – zarówno współczesnej, jak i plejstoceńskiej (Dobiński, 1997a; Dec i Dobiński, 1997, 1998). Również na Kasprowym Wierchu wymieniony autor przeprowadził sondowania sejsmiczne. Za ośrodek objęty występowaniem wieloletniej zmarzliny uznał warstwę zalegającą na głębokości od 1,5-3,0 m do 9-15 m (Dobiński, 2011).

Sondowania georadarowe

Sondowania georadarowe służące między innymi detekcji wieloletniej zmarzliny były stosowane w wielu miejscach Tatr przez różne zespoły. Szereg sondowań wykonano na przykład przy ocenie warunków geotechnicznych potrzebnej do modernizacji kolejki linowej na Kasprowy Wierch (Kotyrbka i inni, 2004). Według W. Dobińskiego (2011) również wyniki tych badań wskazują na występowanie wieloletniej zmarzliny na Kasprowym Wierchu.

Latem 2006 r. P. Lamparski i S. Kędzia (2007) przeprowadzili pierwsze sondowania georadarowe w Koziej Dolince. Najwięcej georadarowych profili wyko-

nano na stożku piargowym pod Kozim Wierchem. Na żadnym z przeprowadzonych profili nie stwierdzono prędkości propagacji fal elektromagnetycznych charakterystycznych dla lodu. Otrzymane dane sugerują występowanie wieloletniej zmarzliny w postaci przemarzniętego gruzu i gleby. Warstwa o prędkości fal typowej dla zamrzniętych gruntów znajdowała się w środkowej części piargu pod Kozim Wierchem na głębokości około 2,5-3,0 m, natomiast w dolnej części piargu na głębokości około 1,5 m, co jest zgodne z wartościami otrzymanymi z przeprowadzonych wcześniej sondowań elektrooporowych (Lamparski i Kędzia, 2007).

Jesienią 2008 r. w Koziej Dolince powtórnie zostały przeprowadzone sondowania georadarowe – przez B. Gądkę, M. Grabca i S. Kędzię (2013). Zastosowanie anten o częstotliwości 200 MHz i 25 MHz oraz zwiększenie liczby i długości profili w stosunku do poprzednich pomiarów, nadało im kompleksowy charakter i dało wiele interesujących informacji na temat budowy pokryw gruzowych oraz występowania wieloletniej zmarzliny. W środkowej oraz częściowo dolnej części stożka piargowego, w warstwie o grubości 8 m, stwierdzono prędkość propagacji fal elektromagnetycznych typową dla zamrzniętych gruntów (Gądek i inni, 2013).

Pomiar ruchu na lodowcach gruzowych i stożkach piargowych

W 2000 r. Ł. Ostrowski (2002) postanowił za pomocą precyzyjnych pomiarów DGPS (*Differential Global Positioning System*) zmierzyć ewentualny ruch na reliktowym lodowcu gruzowym w Świstówce Rostockiej oraz na stożku piargowym pod Kozim Wierchem w Koziej Dolince. Obserwacje prowadzone w roku 2000 i 2001 wykazały przemieszczenie się stanowisk, którego wartość mieściła się w granicach błędu pomiarowego, zatem nie można tego pomiaru uznać za wiarygodny dowód na występowanie ruchu w obrębie badanych form. W 2008 r. M. Ciepły (2011) przeprowadził kolejne pomiary ruchu lodowca gruzowego w Świstówce Rostockiej, obejmowały one okres 8 lat (od roku 2000 do 2008). Z siedmiu stanowisk rozmieszczonych wzdłuż wspomnianej formy tylko na trzech, usytuowanych w górnej części lodowca, zanotowano ruch. Największe przesunięcie punktu pomiarowego wynosiło około 6 m, natomiast najmniejsze około 10 cm. Za najbardziej prawdopodobną przyczynę ruchu zarejestrowanego na punktach pomiarowych M. Ciepły uważa występowanie wieloletniej zmarzliny. W 2014 roku S. Kędzia przeprowadził na wspomnianym lodowcu gruzowym pomiary lichenometryczne, które jednak wykluczyły występowanie w ostatnich kilkuset latach jakiegokolwiek ruchu całości lub części lodowca, spowodowanego występowaniem zmarzliny (Kędzia, 2014).

Podsumowanie

Prowadzone od około dwudziestu lat nowoczesne badania dotyczące wieloletniej zmarzliny w polskiej części Tatr nie tylko potwierdziły jej występowanie, lecz również dostarczyły wiele informacji dotyczących jej klimatycznych i topograficznych uwarunkowań. W Tatrach, oprócz aktywnej zmarzliny holocenińskiej, prawdopodobnie występuje również nieaktywna zmarzlina plejstoceńska. Miąższość wieloletniej zmarzliny waha się od kilku do kilkudziesięciu metrów. Oprócz zmarzliny sporadycznej w polskiej części Tatr występuje również zmarzlina nieciągła (Dobiński, 1997a, 2011). Mimo że literatura dotycząca przemarzania gruntu i występowania wieloletniej zmarzliny w Tatrach jest dosyć obfita, w wielu międzynarodowych opracowaniach z tego zakresu Tatry są pomijane (np. Harris i inni, 2009).

Na wielu obszarach kuli ziemskiej wieloletnia zmarzlina powoduje istotne problemy gospodarcze i społeczne. W polskiej części Tatr, ze względu na ograniczoną infrastrukturę podyktowaną ochroną przyrody oraz niewielki i wysoko położony obszar występowania wieloletniej zmarzliny, problem gospodarczy jest znikomy. Jednakże z naukowego punktu widzenia wieloletnia zmarzlina górską, jako czuły wskaźnik zmian klimatu, jest ważnym obiektem badawczym. Z tego powodu istnieje potrzeba prowadzenia dalszych badań nad wieloletnią zmarzliną w Tatrach. Ze względu na cenny przyrodniczo obszar Tatr, głównym celem dalszych badań powinien być monitoring temperatury warstwy czynnej i śledzenie – przy użyciu metod geofizycznych – grubości i wielkości powierzchni przemarzniętej warstwy. Należy również poszerzyć wiedzę z zakresu współczesnego występowania wieloletniej zmarzliny i jej roli w formach peryglacjalnych.

*

Autor serdecznie dziękuje prof. dr. hab. Adamowi Kotarbie, dr. hab. Wojciechowi Dobińskiemu oraz dr. hab. Bogdanowi Gądkowi za cenne uwagi podczas pisania artykułu.

Piśmiennictwo / References

- Baranowski J., Kędzia S., Rączkowska Z., 2004, *Soil freezing and its relation to slow soil movements on Alpine slopes (of the Tatra Mountains, Poland)*, Analele Universitatii de Vest din Timisoara. Geografie, 14, s.169-179.
- Baranowski J., Kędzia S., Rączkowska Z., 2005, *Badania przemieszczania gruntu i przemieszczania pokryw w otoczeniu Hali Gąsienicowej*, [w:] K. Krzemień, J. Trepieńska, A. Bokwa (red.), *Rola stacji terenowych w badaniach geograficznych*, IGiGP UJ, Kraków, s. 251-261.
- Cieply M., 2011, *Dynamika i przyczyny ruchu formy gruzowej w Świstówce Rostockiej*, [w:] R. Machowski, M.A. Rzętała (red.), *Z badań nad wpływem antropopresji na środowisko*, Studenckie Koło Naukowe Geografów UŚ, Wydział Nauk o Ziemi UŚ, Sosnowiec.

- Czudek T., 1986, *Pleistocenni permafrost na uzemi Československa*, Geografický Časopis, 38, 2-3, s. 245-252.
- Dec J., Dobiński W., 1997, *Preliminary results of a seismic refraction survey on Hruby Piarg in the Five Polish Lake Valley, Tatra Mountains, Southern Poland*, [w:] *Wyprawy Geograficzne na Spitsbergen*, UMCS Lublin, s. 69-76.
- Dec J., Dobiński W., 1998, *Wyniki refrakcyjnych badań sejsmicznych na Hrubym Piargu w Dolinie Pięciu Stawów Polskich w Tatrach*, [w:] A. Kotarba (red.), *Z badań fizycznogeograficznych w Tatrach*, III, Dokumentacja Geograficzna, 12, s. 59-67.
- Dobiński W., 1996a, *Problem występowania wyspowej zmarzliny w Dolinie Pięciu Stawów Polskich i okolicy w świetle pomiarów temperatury u spodu zimowej pokrywy śnieżnej (BTS)*, Geographia. Studia et Dissertationes, 20, Prace Naukowe Uniwersytetu Śląskiego, 1552, s. 15-22.
- Dobiński W., 1996b, *Występowanie zmarzliny w alpejskim piętrze Tatr Wysokich w świetle badań geofizycznych i analiz klimatycznych*, [w:] A. Kotarba (red.), *Przyroda Tatrzańskiego Parku Narodowego a Człowiek*, TPN, PTPNoZ, Zakopane-Kraków, s. 140-143.
- Dobiński W., 1996c, *Poszukiwanie zmarzliny w Tatrach z zastosowaniem metod geofizycznych i analizy klimatycznej*, [w:] *Osady i formy czwartorzędowe współczesnego i plejstocenijskiego zlodowacenia półkuli północnej – symposium. Poznań 17-18.10.1996*, streszcz. referatów, Poznań, s. 16-17.
- Dobiński W., 1997a, *Warunki występowania zmarzliny w alpejskim piętrze Tatr Wysokich*, Uniwersytet Śląski, Sosnowiec, maszynopis.
- Dobiński W., 1997b, *Rozmieszczenie zmarzliny w Tatrach Wysokich w oparciu o wskaźniki tajania i zamrozu*, Biuletyn Peryglacjalny, 36, s. 29-45.
- Dobiński W., 1998a, *Problem występowania zmarzliny w Tatrach Wysokich w świetle badań geofizycznych wykonanych w Dolinie Pięciu Stawów Polskich i Świstówce Rostockiej*, [w:] A. Kotarba (red.), *Z badań fizycznogeograficznych w Tatrach*, III, Dokumentacja Geograficzna, 12, s. 35-58.
- Dobiński W., 1998b, *Permafrost Occurrence in the Alpine Zone of the Tatra Mountains, Poland*, [w:] A.G. Lewkowicz, M. Allard (red.), *Proceedings of the Seventh International Conference on Permafrost, June 23-27, 1998, Yellowknife, Kanada*, 57, s. 231-237.
- Dobiński W., 2004a, *Wieloletnia zmarzlina w Tatrach: geneza, cechy, ewolucja*, Przegląd Geograficzny, 76, 3, s. 327-343.
- Dobiński W., 2004b, *Granica występowania wieloletniej zmarzliny w Tatrach*, Czasopismo Geograficzne, 75, 1-2, s. 123-132.
- Dobiński W., 2006, *Występowanie wieloletniej zmarzliny w Karpatach i Bałkanach na podstawie wskaźników tajania i zamrozu*, [w:] A. Kotarba, W. Borowiec (red.), *Tatrzański Park Narodowy na tle innych górskich terenów chronionych. T. 1. Nauki o Ziemi*, TPN, PTPNoZ, Zakopane-Kraków, s. 23-27.
- Dobiński W., 2011, *Wieloletnia zmarzlina w wybranych obszarach Tatr, Gór Skandynawskich i Spitsbergenu w świetle kompleksowych badań geofizycznych i analiz klimatologicznych*, Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice.
- Dobiński W., Gądek B., Żogała B., 1996a, *Wyniki badań geoelektrycznych w Tatrach Wysokich*, [w:] A. Kotarba (red.), *Przyroda Tatrzańskiego Parku Narodowego a człowiek*, TPN, PTPNoZ, Zakopane-Kraków, s. 144-147.
- Dobiński W., Gądek B., Żogała B., 1996b, *Wyniki geoelektrycznych badań osadów czwartorzędowych w piętrze alpejskim Tatr Wysokich*, Przegląd Geologiczny, 44, 3, s. 259-261.
- Dobiński W., Żogała B., Wzientek K., Litwin L., 2008, *Results of geophysical surveys on Kasprowy Wierch, the Tatra Mountains, Poland*, [w:] C. Hauck, C. Kneisel (red.),

- Applied Geophysics in Periglacial Environments*, Cambridge University Press, Cambridge, s. 126-136.
- Gądek B., 2012, *Debris slopes ventilation in the periglacial zone of the Tatra Mountains (Poland and Slovakia): The indicators*, Cold Regions Science and Technology, 74-75, s. 1-10.
- Gądek B., Grabiec M., Kędzia S., 2013, *Rzeźba i wybrane elementy klimatu najwyższej położonych cyrków polodowcowych na przykładzie Koziej Dolinki*, [w:] Z. Rączkowska, A. Kotarba (red.), *Dolina Suchej Wody w Tatrach. Środowisko i jego współczesne przemiany*, Prace Geograficzne, IGiPZ PAN, 239, s. 49-66.
- Gądek B., Kędzia S., 2006, *Reżim termiczny gruntu u spodu pokrywy śnieżnej w strefie wieloletniej zmarzliny w Tatrach*, [w:] A. Kotarba, W. Borowiec (red.), *Tatrzański Park Narodowy na tle innych górskich terenów chronionych*, TPN, PTPNoZ, Zakopane-Kraków, s. 109-115.
- Gądek B., Kędzia S., 2007, *Metamorphosis of snow cover in the zone of sporadic permafrost occurrence in Tatra Mountains, Poland*, [w:] *International Symposium on Snow Science, 3-7 September 2007, Moscow, Russia*, International Glaciological Society, Moscow, s. 38.
- 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 Process, 19, s. 315-321.
- Gądek B., Kędzia S., 2009, *Problem detekcji wieloletniej zmarzliny na podstawie temperatury u spągu zimowej pokrywy śnieżnej na przykładzie Tatr*, Przegląd Geograficzny, 81, 1, s. 75-91.
- Gądek B., Leszkiewicz J., 2010, *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, s. 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, s. 75-83.
- Gerlach T., 1971, *Contribution a la connaissance du developpement actuel des buttes gazonnees (thufurs) dans les Tatras Polonaises*, *Processus periglaciaires etudes sur le terrain, Symposium International de Geomorphologie Liege-Caen 1-9 juillet 1971*, Union Geographique Internationale, s. 57-74.
- Gryczmański M., Dobiński W., Salamak M., 2004, *Ekspertyza geotechniczna dla potrzeb przebudowy kolei linowej na Kasprowy Wierch (odcinek Myślenickie Turnie-Kasprowy Wierch)*, Gliwice, ISPiK (niepublikowane).
- Haeberli W., Patzelt G., 1982, *Permafrostkartierung im gebiet Der Hochebenkar- Blockgletscher, Obergurgl, Ötztaler Alpen*, *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 18, 2, s. 127-150.
- Haeberli W., 1985, *Creep of mountain permafrost: Internal structure and flow of Alpine rock glaciers*, *Mitteilungen der VWHG/ETH, Zurich*, 77.
- Harris Ch., Arenson L.U., Christiansen H.H., Etzelmüller B., Frauenfelder R., Gruber S., Haeberli W., Hauck Ch., Hölzle M., Humlum O., Isaksen K., Kääb A., Kern-Lütschg M.A., Lehning M., Matsuoka N., Mutton J.B., Nötzli J., Philips M., Ross N., Seppälä M., Springman S.M., Vonder Moll D., 2009, *Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses*, *Earth-Science Reviews*, 92, s. 117-171.
- Harris S.A., 1981, *Distribution of zonal permafrost landforms with freezing and thawing indices*, *Biuletyn Peryglacjalny*, 29, s. 163-182.

- Hess M., 1963, *Problems of the Perinival Climate in the Tatra Mountains*, Bulletin de L'academie Polonaise des Sciences, Serie des geologiques et geographiques, 1, 4, s. 247-251.
- Jahn A., 1950, *Gleby strukturalne w polskiej części Tatr*, Przegląd Geograficzny, 22, s. 121-139.
- Jahn A., 1958, *Mikrorelief peryglacjalny Tatr i Babiej Góry*, Biuletyn Peryglacjalny, 6, s. 57-80.
- Jahn A., 1970, *Najniższe stanowisko czynnych gruntów strukturalnych w Tatrach i problem dolnej granicy występowania zjawisk peryglacjalnych w górach*, Acta Geographica Lodziensia, 24, s. 217-224.
- Kędzia S., 2004, *Klimatyczne i topograficzne uwarunkowania występowania wieloletniej zmarzliny w Tatrach Wysokich (na przykładzie Koziej Dolinki)*, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN, Warszawa, maszynopis.
- Kędzia S., 2006, *Winter thermal regime of ground in the Kozia Dolinka valley (Polish High Tatra Mts.)*, [w:] I. Smolova (red.), *Geomorfologice vyzkumy w roce 2006*, Vydavatelstvi Univerzita Palackeho, Olomouc, s. 100-103.
- Kędzia S., 2014, *Are there any active rock glaciers in the Tatra Mountains?*, *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica* (w druku).
- Kędzia S., Mościcki J., 2000, *The multiannual permafrost occurrence in the High Tatra Mountains Kozia Valley. Case study*, [w:] D. Balteanu, M. Ielenicz, N. Popescu (red.), *Geomorphology of the Carpatho-Balcan Region. Proceedings of the Carpatho-Balcan Conference, Baile Herculane, Orsova, Drobeta Turnu Severin, Romania, October 11-17, 1998*, Editura Corint, Bucuresti, s. 100-106.
- 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, Quaternary palaeogeography and changes of the polar environment. Polar session. IV Conference of Polish Geomorphologists, Lublin, 3-6 June 1998*, Spitsbergen Geographical Expeditions, Maria Curie-Skłodowska University Press, Lublin, s. 51-57.
- Kłapa M., 1963, *Prace Stacji Badawczej Instytutu Geografii PAN na Hali Gąsienicowej w latach 1960 i 1961*, Przegląd Geograficzny, 35, 2, s. 221-237.
- Kłapa M., 1966, *Prace Stacji Badawczej Instytutu Geografii PAN na Hali Gąsienicowej w latach 1962-1964*, Przegląd Geograficzny, 38, 2, s. 253-268.
- Kotarba A., 1988, *Fossil rock glaciers In the polish Tatra Mountains: origin and age*, [w:] M. Pécsi, L. Starkel (red.), *Paleogeography of Carpathian Regions*, Geographical Research Institute Hungarian Academy of Sciences, 47, s. 161-169.
- Kotyrbka A., Siwek S., Braszczak A., 2004, *Studium badawczo-rozwojowe zastosowania metody georadarowej do oceny warunków geotechnicznych posadowienia obiektów budowlanych kolei linowej na Kasprowy Wierch*, Główny Instytut Górnictwa, Katowice, maszynopis.
- Lamparski P., Kędzia S., 2007, *Permafrost occurrence in Kozia Dolinka (High Tatra Mountains) in light of ground penetrating radar investigations*, *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 7, 1, s. 82-88.
- Mościcki W.J., 2008, *Temperature regime on northern slopes of Hala Gąsienicowa in the Polish Tatra Mountains and its relationship to permafrost*, *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, 42, s. 23-40.
- Mościcki W.J., 2010, *Temperatura na NE stoku Świnicy i w Koziej Dolince w Tatrach w okresie 2007-2009*, [w:] A. Kotarba (red.), *Przyroda Tatrzańskiego Parku Narodowego a człowiek*, TPN, PTPNoZ, Zakopane-Kraków, s. 95-102.

- Mościcki W.J., 2011, *The use of the DC Resistivity Sounding in high mountains areas – example from periglacial zone of the Sucha Woda Valley (Tatra Mts., Poland)*, *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, 45, s. 107-120.
- Mościcki J.W., Kędzia S., 2000, *Comments and observations on the application of resistivity sounding in the research of permafrost*, *Biuletyn Peryglacjalny*, 39, s. 69-81.
- Mościcki J.W., Kędzia S., 2001, *Investigation of mountain permafrost in the Kozia Dolinka valley, Tatra Mountains, Poland*, *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 55, s. 235-240.
- Mościcki J.W., Kędzia S., 2002, *Wieloletnia zmarzlina w Koziej Dolince*, [w:] W. Borowiec, A. Kotarba, A. Kownacki, Z. Krzan, Z. Mirek (red.), *Przemiany środowiska przyrodniczego Tatr*, Wydawnictwo Instytutu Botaniki PAN, Kraków-Zakopane, s. 67-69.
- Oleksynowa K., Skiba S., 1976, *Geochemical characterization of a polygonal soil on the flattening of Krzyżne Pass in the Tatra Mts.*, *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, 10, s. 27-47.
- Oleksynowa K., Skiba S., 1977, *Charakterystyka niektórych gleb kriogenicznych w Tatrach*, *Roczniki Gleboznawcze*, 28, s. 293-311.
- Ostrowski Ł., 2002, *Próba określenia dynamiki form gruzowych w wybranych dolinach Tatr Wysokich*, *Archiwum Katedry Geomorfologii, Uniwersytet Śląski, Sosnowiec (maszynopis)*.
- Pulina M., 1968, *Gleby poligonalne w Jaskini Czarnej (Tatry Zachodnie)*, *Speleologia*, 3, 2, s. 99-102.
- Pulinowa M.Z., Pulina M., 1972, *Phénomènes cryogènes dans les grottes et gouffres des Tatras*, *Biuletyn Peryglacjalny*, 21, s. 201-235.
- Siarzewski W., 1996, *Jaskinie lodowe w Tatrach Polskich*, [w:] A. Kotarba (red.), *Przyroda Tatrzańskiego Parku Narodowego a człowiek*, TPN, Polskie TPNoZ, Zakopane-Kraków, s. 98-101.

[Wpłynęło: lipiec 2014; poprawiono: styczeń 2015 r.]

STANISŁAW KĘDZIA

AN OUTLINE OF THE HISTORY OF GROUND FREEZING AND PERMAFROST RESEARCH IN THE POLISH TATRA MOUNTAINS

Studies on ground freezing and permafrost in the Polish Tatra Mountains have been conducted for approximately 70 years. The first studies concerned the presence of polygonal soils and were carried out by A. Jahn in the second half of the 1940s. The author also continued with his research in subsequent years. Further studies concerning ground freezing were conducted by Maria and Mieczysław Kłapa, M. Hess and T. Gerlach, using Danilin soil-freezing meters and soil thermometers. These studies were carried out in the upper part of the Sucha Woda Valley (at the station of the Institute of Geography of the Polish Academy of Sciences), as well as in the Karczmisko Pass, Kozia Dolinka Valley, Krzyżne Pass and Liliowe Pass. Apart from the measurements associated with ground freezing, soil movements caused by frost phenomena were also observed.

In 1993, W. Dobiński and his team of geophysicists began studies to demonstrate the presence of permafrost in the Tatra Mountains. They used the BTS method, Harris's thawing and freezing indices, electrical resistivity soundings, electrical resistivity

tomography as well as electromagnetic, seismic and georadar soundings. These studies were conducted in the Dolina Pięciu Stawów Polskich Valley and in the region of Kasprowy Wierch peak. W. Dobiński was the first author to prove the existence of contemporary permafrost in the Polish Tatra Mountains. In his view, Pleistocene permafrost may even be found at some sites, such as Gruby Piarg in the Dolina Pięciu Stawów Polskich Valley.

In 1995, J. Mościcki and S. Kędzia began their studies on permafrost. The measurements were mainly made in the Kozia Dolinka Valley. In subsequent years, J. Mościcki expanded his area of research and included Zadnie Koło on the Świnica peak. A pyrometer was used in this case, as well as the BTS method, a thermovision camera, soil temperature measurements and electrical resistivity soundings. The authors again demonstrated the presence of permafrost on the scree slopes of the Kozi Wierch and Kozie Czuby peaks.

Later, S. Kędzia and P. Lamparski, as well as B. Gądek and M. Grabiec, conducted georadar soundings in the Kozia Dolinka Valley. They likewise confirmed the presence of permafrost in this postglacial valley.

In 2008, S. Kędzia and B. Gądek used automatic temperature measurements on the bottom of the snow layer to determine the winter thermal regime of ground in places with and without permafrost.

In 2010, B. Gądek and J. Leszkiewicz determined the spatial relationships between air temperature, snow-layer thickness and ground surface temperature in places characterised by various kinds of topography.

In 2001, J. Baranowski and Z. Rączkowska began studies on ground temperature in the upper part of the Goryczkowa Świńska Valley. Their studies revealed the absence of contemporary permafrost from this location.

Ł. Ostrowski, followed by M. Ciepły began measuring the movement of the rock glacier in Świstówka Rostocka. M. Ciepły suggested that this moved due to the presence of permafrost. However, the subsequent lichenometric studies conducted by S. Kędzia in this area ruled out activity on the part of the glacier.

The studies on ground freezing and permafrost in the Tatra Mountains, which have been conducted for approximately 70 years, have delivered much interesting information regarding the thermal regime experienced by ground in the higher parts of the Tatra Mountains, as well as on the climatic and topographic conditions for the existence of permafrost. From the scientific point of view, mountain permafrost, as a sensitive indicator of climate change, is a significant research object. It is therefore necessary for further studies on this theme to be carried out in the Tatra Mountains.

