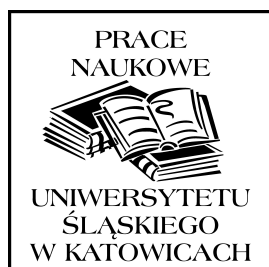


**Wieloletnia zmarzlina  
w wybranych obszarach  
Tatr, Gór Skandynawskich i Spitsbergenu  
w świetle kompleksowych badań geofizycznych  
i analiz klimatologicznych**

*ad maiorem Dei gloriam et Beatissime Virginis Mariae honorem*



NR 2850

Wojciech Dobiński

**Wieloletnia zmarzlina  
w wybranych obszarach  
Tatr, Gór Skandynawskich i Spitsbergenu  
w świetle kompleksowych badań geofizycznych  
i analiz klimatologicznych**



Redaktor serii: Nauki o Ziemi

**Andrzej T. Jankowski**

Recenzenci

**Piotr Migoń, Wiesław Ziaja**

Publikacja będzie dostępna – po wyczerpaniu nakładu – w wersji internetowej:

Śląska Biblioteka Cyfrowa

**[www.sbc.org.pl](http://www.sbc.org.pl)**

Redaktor: Barbara Todos-Burny  
Projektant okładki: Paulina Tomaszewska-Ciepły  
Redaktor techniczny: Barbara Arenhövel  
Korektor: Mirosława Żłobińska

Copyright © 2011 by  
Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego  
Wszelkie prawa zastrzeżone

**ISSN 0208-6336**  
**ISBN 978-83-226-2009-0**

Wydawca

**Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego**  
**ul. Bankowa 12B, 40-007 Katowice**  
[www.wydawnictwo.us.edu.pl](http://www.wydawnictwo.us.edu.pl)  
e-mail: [wydawus@us.edu.pl](mailto:wydawus@us.edu.pl)

Wydanie I. Ark. druk. 21,5 + 1 wklejka. Ark. wyd. 22,0.  
Papier offset. kl. III, 90 g                      Cena 30 zł (+ VAT)

Łamanie: Pracownia Składu Komputerowego  
Wydawnictwa Uniwersytetu Śląskiego  
Druk i oprawa: PPHU TOTEM s.c.  
M. Rejnowski, J. Zamiara  
ul. Jacewska 89, 88-100 Inowrocław

# Spis treści

<b>1. Wprowadzenie oraz cel i zakres pracy . . . . .</b>	<b>7</b>
1.1. Cel i zakres pracy . . . . .	8
<b>2. Charakterystyka wieloletniej zmarzliny: procesy, występowanie, wiek .</b>	<b>11</b>
2.1. Wstęp . . . . .	11
2.2. Wieloletnia zmarzlina . . . . .	12
2.2.1. Termin i definicja . . . . .	12
2.2.2. Odkrycie i pierwsze badania wieloletniej zmarzliny . . . . .	14
2.2.3. Procesy towarzyszące występowaniu wieloletniej zmarzliny . . . . .	14
2.2.4. Warstwa czynna . . . . .	18
2.2.5. Cyrkulacja Balcha . . . . .	20
2.2.6. Permafrost aktywny . . . . .	20
2.2.7. Reżym termiczny . . . . .	22
2.2.7.1. Thermal offset, <i>n</i> -factor, TTOP . . . . .	24
2.2.8. Wiek permafrostu, rola czasu w występowaniu wieloletniej zmarzliny .	25
2.2.9. Miąższość wieloletniej zmarzliny . . . . .	27
2.3. Lód i permafrost w środowisku glacialnym i peryglacialnym oraz ich wzajemna relacja . . . . .	27
2.3.1. Permafrost peryglacialny . . . . .	29
2.3.2. Permafrost glacialny . . . . .	29
2.3.3. Permafrost podlodowcowy . . . . .	31
2.4. Góry wysokie i permafrost górski . . . . .	32
2.4.1. Góry wysokie . . . . .	32
2.4.2. Permafrost górski . . . . .	33
2.5. Występowanie wieloletniej zmarzliny na Ziemi . . . . .	35
2.6. Specyfika występowania strefy peryglacialnej . . . . .	39
2.6.1. Dyskusja . . . . .	41
2.7. Występowanie górskiego permafrostu w Europie . . . . .	42
2.7.1. Karpaty i Sudety . . . . .	42
2.7.2. Skandynawia . . . . .	44
2.7.3. Spitsbergen . . . . .	45
2.7.4. Alpy i góry Jura . . . . .	46
2.7.5. Półwysep Pirenejski . . . . .	46
2.7.6. Półwysep Apeniński . . . . .	47
2.7.7. Góry Półwyspu Bałkańskiego . . . . .	47
2.7.8. Islandia . . . . .	47
2.7.9. Ural . . . . .	48
2.7.10. Podsumowanie . . . . .	48
2.8. Polskie badania wieloletniej zmarzliny . . . . .	49
<b>3. Występowanie wieloletniej zmarzliny w górskim środowisku peryglacialnym wybranych obszarów Tatr, Laponii i Spitsbergenu . . . . .</b>	<b>53</b>
3.1. Wstęp . . . . .	53
3.2. Metodyka badań . . . . .	54

3.2.1. Metoda klimatyczna . . . . .	55
3.2.2. Metody geofizyczne . . . . .	57
3.2.2.1. Punktowe sondowania elektrooporowe VES . . . . .	57
3.2.2.2. Tomografia elektrooporowa ERT . . . . .	58
3.2.2.3. Metody elektromagnetyczne – EM . . . . .	59
3.2.2.4. Sejsmika refrakcyjna – RS . . . . .	60
3.2.2.5. Metoda georadarowa – GPR . . . . .	60
3.3. Charakterystyka obszarów badań . . . . .	61
3.3.1. Tatry . . . . .	62
3.3.2. Okolice Abisko i Kebnekaise, północna Szwecja . . . . .	64
3.3.3. Okolice fiordu Hornsund, Spitsbergen . . . . .	65
3.4. Wyniki badań . . . . .	66
3.4.1. Wyniki analizy klimatycznej . . . . .	66
3.4.1.1. Hornsund, Spitsbergen . . . . .	67
3.4.1.2. Dalnyje Zelency . . . . .	68
3.4.1.3. Abisko . . . . .	69
3.4.1.4. Tarfala . . . . .	69
3.4.1.5. Tatry – Kasprowy Wierch . . . . .	70
3.4.1.6. Tatry – Łomnicki Szczyt . . . . .	71
3.4.1.7. Północny Atlantyk . . . . .	72
3.4.1.8. Wykres S.A. Harrisa . . . . .	72
3.4.1.9. Dyskusja wyników . . . . .	73
3.4.1.10. Podsumowanie. . . . .	73
3.4.2. Wyniki badań geofizycznych . . . . .	74
3.4.2.1. Kasprowy Wierch . . . . .	74
3.4.2.2. Interpretacja wyników badań w odniesieniu do występowania permafrostu . . . . .	82
3.4.2.3. Wyniki badań w okolicy Myślenickich Turni i dolnej części stoku Kasprowego Wierchu . . . . .	84
3.4.2.4. Wyniki badań geofizycznych przeprowadzonych w okolicy Abisko . . . . .	88
3.4.2.5. Wyniki badań geofizycznych w okolicy fiordu Hornsund . . . . .	120
3.4.2.6. Interakcja lodowców i wieloletniej zmarzliny . . . . .	127
3.4.2.7. Podsumowanie . . . . .	139
<b>4. Prawdopodobieństwo występowania wieloletniej zmarzliny w wybranych obszarach badań.</b> . . . . .	<b>140</b>
4.1. Wstęp . . . . .	140
4.2. Wiek i geneza wieloletniej zmarzliny w obszarach badań . . . . .	140
4.2.1. Wiek i geneza wieloletniej zmarzliny w Tatrach . . . . .	142
4.2.2. Wiek i geneza wieloletniej zmarzliny w Abisko . . . . .	143
4.3. Ewolucja i geofizyczny model występowania wieloletniej zmarzliny w okolicy Abisko i na Kasprowym Wierchu . . . . .	145
4.3.1. Podobieństwa w występowaniu permafrostu w innych obszarach górskich w Europie . . . . .	147
4.4. Prawdopodobieństwo interakcji wieloletniej zmarzliny z lodowcami. . . . .	148
<b>5. Wnioski</b> . . . . .	<b>151</b>
<b>Literatura</b> . . . . .	<b>155</b>
Summary. . . . .	169
Zusammenfassung . . . . .	171

# 1. Wprowadzenie oraz cel i zakres pracy

Badania środowiska peryglacjalnego mają w Polsce długą i bogatą tradycję, a ich owocem jest wiele wybitnych osiągnięć w tej dziedzinie. Można zaryzykować stwierdzenie, że dzięki nim powstała nowa dyscyplina naukowa. Inicjuje ją z jednej strony wprowadzenie przez Walerego ŁOZIŃSKIEGO w 1909 r. pojęcia „peryglacja”, które otwiera drogę nowemu postrzeganiu procesów rzeźbotwórczych w mroźnym klimacie. Z drugiej strony, kapitalne spojrzenie Łozińskiego poprzedza nie mniejszej wagi syntetyczne ujęcie występowania stale przemarznętego gruntu na Syberii autorstwa Leonarda JACZEWSKIEGO, który jako pierwszy wyznaczył na Syberii jego granicę i w 1889 r., w pracy pt. *O večno merzloj počve v Sibiri*, publikował pierwszą w świecie mapę z granicą południowego zasięgu występowania – jak wówczas mówiono – „wiecznej zmarzliny”. Ten sam autor wprowadził również rozgraniczenie o podstawowym znaczeniu dla przedmiotu niniejszej rozprawy – między permafrostem górskim a arktycznym.

W ten sposób w ujęciu procesowym i przestrzennym określone zostały podwaliny dyscypliny naukowej, której przedmiotem są formy oraz procesy indukowane czasową i przestrzenną współzależnością zimnego klimatu i związanego z nim przemarzania litosfery – zmarzlinoznawstwa.

Pierwotnie ta dyscyplina badań wiązana była z rozległymi obszarami Arktyki i Syberii, później – Alaski i północnej Kanady. Dziś wiemy, że strefa peryglacjalna występuje we wszystkich szerokościach geograficznych, a jej występowanie związane jest z ochładzaniem klimatu, które w środowisku górskim ma charakter piętrowy (wertikalny), natomiast w środowisku okołobiegunowym – strefowy (horyzontalny).

Jak już powiedziano, zmienność zasięgu strefy peryglacjalnej ma także charakter czasowy. Jej

zasięg związany jest ze zmianami klimatu, jakie miały miejsce w przeszłości i zachodzą współcześnie. Do niedawna używany, nieaktualny już dziś, termin „wieczna zmarzlina” wiązany był w powszechnym przekonaniu z bardzo mroźnymi obszarami subarktycznych części Syberii i północnej Kanady. Kojarzona była ona z mroźnym, suchym i głównie kontynentalnym klimatem tych obszarów. Badania naukowe tego zjawiska rozpoczęto na Syberii w połowie XVIII w. Jednak pierwsze badania wieloletniej zmarzliny środowiska wysokogórskiego zainicjowano zaledwie ok. 60 lat temu, a szerszy monitoring górskiego permafrostu – dopiero ok. 30 lat temu. Wieloletnia zmarzlina definiowana jest obecnie w kategoriach fizycznych, jej monitoring sprowadza się więc w zasadzie wyłącznie do pomiaru temperatury w obrębie stale przemarznętej litosfery i w towarzyszącej jej warstwie sezonowo rozmarzającej.

Najbardziej widoczny postęp, a nawet swego rodzaju przełom w postrzeganiu litosfery pozostającej w temperaturze ujemnej, nastąpił w ostatnich dziesięcioleciach, w trakcie których widocznie wzrosła liczba badań górskiego permafrostu.

Jeszcze w połowie lat 80., a nawet do początku lat 90. minionego wieku żywiono przekonanie, że wieloletnia zmarzlina pokrywa jedynie 14% powierzchni Ziemi (MARCINEK, 1991), podczas gdy kilkanaście lat później, po zintensyfikowaniu badań, zwłaszcza nad permafrostem górskim i antarktycznym, szacowano jej powierzchnię na co najmniej 24% (FRENCH, 2007). Jest to bodajże jedyny w naukach o Ziemi przypadek, gdy jeszcze w ostatnim dziesięcioleciu XX w. globalne niedoszacowanie wynosiło ponad 40%.

Pierwsza informacja na temat występowania permafrostu na Fudżijamie, opublikowana w latach 70. ubiegłego wieku (HIGUCHI, FUJI, 1971),

wprawiła w zdumienie niektórych badaczy wysokogórskiej zmarzliny. Znany badacz górskiego permafrostu A. GORBUNOV początkowo sądził, że wieloletnia zmarzlina na wysokości 2 800 m n.p.m. na stoku północnym i 2 900 m n.p.m. na południowym stoku Fudżijamy to po prostu błędna informacja. Tymczasem na analogicznej szerokości geograficznej w Kunlun Shan, tj. na ok. 36°N, występowanie permafrostu możliwe jest na wysokości powyżej 3 800 m n.p.m., tzn. o 1 km wyżej (GORBUNOV, 2003). Spektakularnym odkryciem było także znalezienie kopalnego lodu na wulkanie na Hawajach (WOODCOCK i in., 1970).

Permafrost górski jest więc zjawiskiem, którego badanie w porównaniu z innymi naukami o Ziemi nie jest szczególnie zaawansowane. Kolejne lata mogą przynieść zatem prace ukazujące nieznaną prawidłowości i obszary jego występowania. Prezentowana praca dotyczy więc bardzo młodej subdyscypliny z dziedziny nauk o Ziemi, która z tego względu, a także z uwagi na rejestrowane współcześnie ocieplenie klimatyczne i dążenie krajów Arktyki do intensywnego jej zagospodarowania, prawdopodobnie ma przed sobą okres dynamicznego rozwoju.

## 1.1. Cel i zakres pracy

Dynamiczny i systematyczny rozwój zmarzlinoznawstwa, poddany w coraz większym stopniu rygorom naukowej metodyki, nastąpił dopiero w XX w. W tym okresie wypracowano podstawy pojęciowe (terminologiczne) oraz pośrednie i bezpośrednio metody jej badania. Sytuacja taka doprowadziła do nieuniknionej specjalizacji: badania nad wieloletnią zmarzliną wyodrębniają się w coraz większym stopniu w ramach nauk o Ziemi, a ich rozwój w drugiej połowie XX w. zaczął obejmować również środowisko wysokogórskie. Niniejsza praca wpisuje się głównie w ten ostatni nurt badań.

Głównym celem pracy jest detekcja i poznanie prawidłowości występowania wieloletniej zmarzliny w środowisku górskim, subarktycznym i subpolarnym, w wybranych miejscach leżących na szerokości geograficznej między 49°N a 77°N z zastosowaniem metod geofizycznych i klimatycznych. Kolejnym celem jest poznanie natury, właściwości i zmienności wieloletniej zmarzliny w zależności od ośrodka występowania, a także relacji z lodowcami w warunkach zmieniającego się klimatu. Zadanie to realizowane jest na tle ogólnej charakterystyki badanego przedmiotu,

czyli wieloletniej zmarzliny. Z przeprowadzonych studiów wynika bowiem, że znaczenie i zakres stosowania tego terminu wcale nie są oczywiste.

W pierwszej części pracy nacisk położony został na kwestie podstawowe, do których należą: definicja wieloletniej zmarzliny, towarzysząca jej coraz bardziej obszerna terminologia oraz występowanie permafrostu na świecie, szczególnie w środowisku górskim Europy. Decyzję taką autor podjął uświadomiwszy sobie, że ostatnie syntetyczne opracowanie, w postaci monograficznej, problematyki permafrostu i strefy peryglacialnej w języku polskim ukazało się w 1970 r. (JAHN, 1970b). W ciągu czterdziestu lat, jakie upłynęły od tej pory, postęp w tej dziedzinie jest na tyle istotny, że trudno byłoby przedstawić wyniki badań szczegółowych bez zreferowania najważniejszych osiągnięć i koncepcji dotyczących występowania permafrostu z okresu ostatnich dziesięcioleci, które w systematycznym ujęciu nie są dostępne w języku polskim.

Pierwsza część pracy nie ma jednak charakteru odtwórczego, lecz jest krytyczną analizą dotychczasowych osiągnięć. Autor ma nadzieję, że dzięki temu także ta część pracy nabiera oryginalnego waloru poznawczego.

Należy również zaznaczyć, że niniejsze opracowanie nie jest bezpośrednią kontynuacją bogatego i różnorodnego dorobku naukowców polskich w zakresie badań peryglacialnych, które mają w świecie pionierskie znaczenie. Kojarzone są powszechnie z łódzką szkołą J. DYLIKA, ze szkołą wrocławską A. JAHNA, obecnie zaś kontynuowane są w różnych ośrodkach badawczych w Polsce. Zagadnienie występowania wieloletniej zmarzliny nie było w nich bowiem głównym problemem badawczym. Prace te dotyczą niemal wyłącznie problematyki geomorfologii peryglacialnej, obejmując formy rzeźby lub co najwyżej głębokość sezonowego przemarzania. „Kończą się” więc w miejscu, w którym bierze swój początek przedmiot niniejszej rozprawy (por. rozdz. 2.8).

Wybranymi obszarami badań są Tatry Wysokie – Kasprowy Wierch, Góry Skandynawskie w okolicach Kebnekaise i Abisko, a także – w mniejszym stopniu – okolice fiordu Hornsund na południowym Spitsbergenie (ryc. 1). Obszary te wytyczają zakres przestrzenny pracy. Problematyka rozprawy, w którą wpisane jest także określenie warunków granicznych występowania górskiego permafrostu, z konieczności musi również obejmować permafrost arktyczny, który pojawia się raczej jako jej tło. Trzeba podkreślić, że praca ta nie ma charakteru geomorfologicznego. Wieloletnia zmarzlina nie jest formą rzeźby terenu, a jej występowanie w litosferze nie musi wiązać

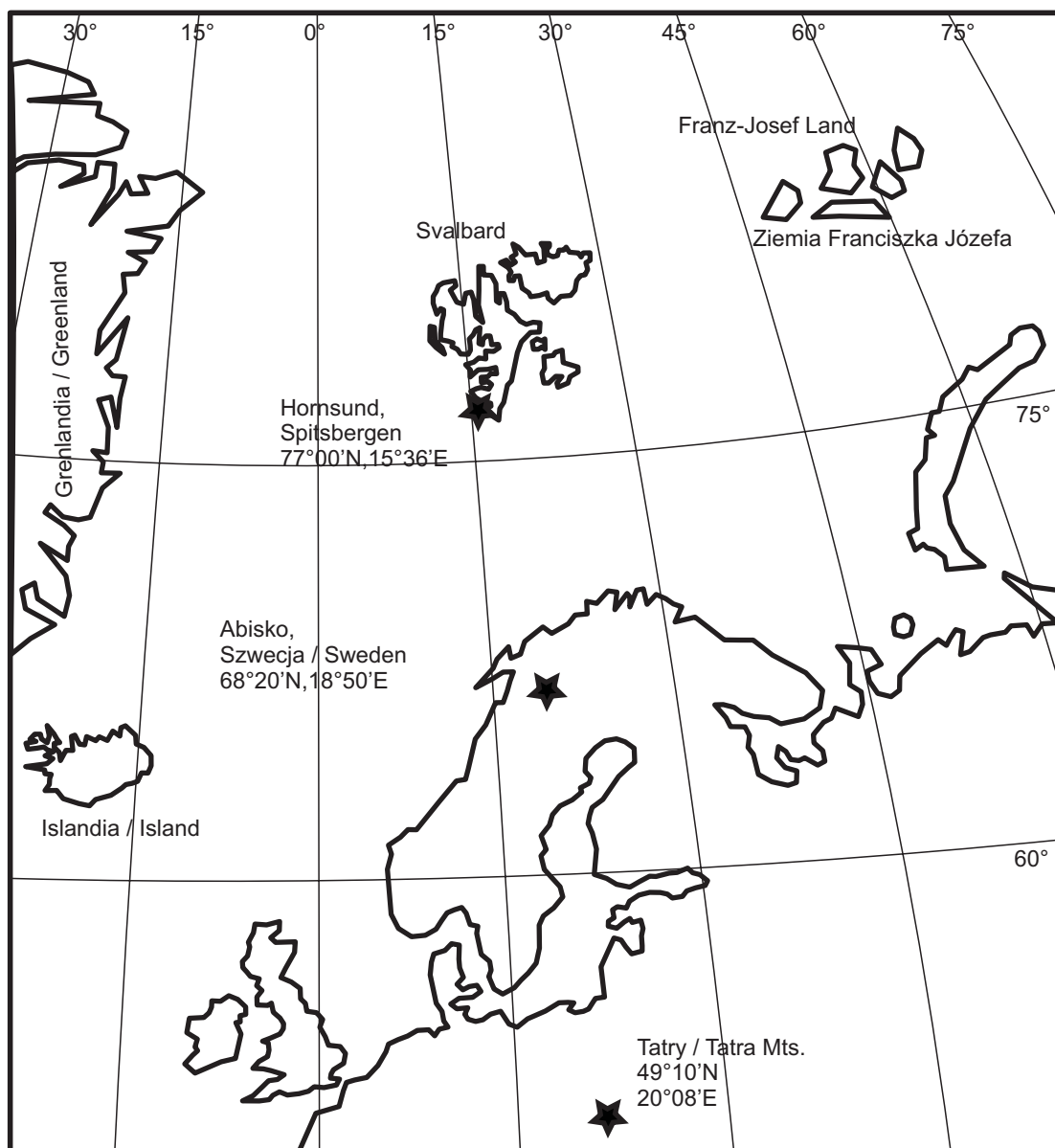


się z charakterystycznymi dla niej procesami geomorfologicznymi. Formy występujące w strefie peryglacjalnej, która powszechnie identyfikowana jest z występowaniem permafrostu, są przedmiotem uwagi autora o tyle, o ile wskazują na występowanie wieloletniej zmarzliny. Istnienie jej w istocie nie musi mieć wielkiego wpływu na rzeźbę powierzchni Ziemi, zwłaszcza gdy obecna jest ona w skałach litych – w postaci tzw. suchego permafrostu, ponieważ proces zamarzania/odmarzania nie powoduje w środowisku przyrodniczym zmian, gdy nie towarzyszy mu występowanie H<sub>2</sub>O w różnej postaci fazowej.

W tekście konsekwentnie zamiennie stosowane są dwa terminy oznaczające to samo: polski „wieloletnia zmarzlina” oraz anglosaski, powszechny w międzynarodowym użyciu, *perma-*

*frost*, który od paru lat próbuje znaleźć sobie miejsce także w publikacjach polskojęzycznych, jako synonim pożyteczny zwłaszcza w złożeniach (np. permafrost fosylny, aktywny itp.). Ponieważ niniejsza praca w całości poświęcona jest wieloletniej zmarzlinie, autor pozwala sobie czasem na uproszczenie, używając tylko pierwszego członu tego terminu, tj. słowa „zmarzlina”. W pracy jest to trzeci synonim, który oznacza wieloletni przemarznięty grunt. Jeśli słowo to zostanie użyte w innym kontekście, będzie to w pracy wyraźnie zaznaczone.

Rozprawa w ograniczonym stopniu dotyka relacji wieloletniej zmarzliny ze zmieniającym się współcześnie klimatem, nie jest też jej przedmiotem prognozowanie ewolucji permafrostu. To zagadnienie, a szerzej – cała problematyka



**Ryc. 1.** Ogólna lokalizacja głównych obszarów badań  
**Fig. 1.** General location of the main research areas

związana z ociepleniem klimatu i wpływem na nie człowieka jest obecnie bardzo popularna, poświęcono jej wiele prac, wystąpień i dyskusji. Wydaje się, że w ostatnich latach zaczęła ona odgrywać rolę dominującą w naukach o Ziemi, osiągając poniekąd pozycję niemal samodzielnej dyscypliny, której podporządkowane są badania

innych dyscyplin z dziedziny nauk o Ziemi. Rozwój tej problematyki jest tak dynamiczny i wielostronny, a także nieco kontrowersyjny, że nie wydaje się, aby autor ze swym zapleczem badawczym mógł wnieść istotny wkład w jej rozwój. Pozostaje ona bowiem na uboczu jego zainteresowań.

*Profesor Jacek Jania zainteresował mnie badaniami lodu i kriosfery. Dziękuję Mu za to, że mogłem zrealizować niemal wszystkie pomysły badawcze, tj. za prawdziwą wolność badań naukowych. On nauczył mnie też pokory – źródła wszystkich cnót, bez której nauka funkcjonować nie może.*

*Recenzentom mojej pracy Profesorom Wiesławowi Ziai i Piotrowi Migoniowi serdecznie dziękuję za wszelkie uwagi i komentarze, dzięki którym udoskonaliłem szczególnie precyzyjną wypowiedź i stronę techniczną rozprawy.*

*Wdzięczny jestem wszystkim, którzy pomagali mi w pracach terenowych, a z którymi spędziłem wiele pracowitych i jednocześnie bardzo przyjemnych chwil. Szczególnie Mariuszowi Grabcowi, który oprócz współpracy terenowej w różnych miejscach udostępnił mi także wyniki badań georadarowych ze Spitsbergenu i dopomógł w wykonaniu interpretacji oraz ilustracji związanych z georadarem. Państwu Jadwidze, Dominice i Adamowi Idziakom dziękuję za wspólne badania sejsmiczne w okolicy Abisko i Kebnekaise, Marcie Kondrackiej i Dariuszowi Ignatiukowi za pomoc w badaniach geofizycznych na Spitsbergenie, Krystianowi Wziętkowi i Bogdanowi Żogale za pomoc w badaniach geofizycznych w okolicy Abisko i w Tatrach. W Tatrach pomocą wspierała mnie także Radosława Tomaszewska. Panu Andrzejowi Kotyrbie pragnę podziękować za niektóre dane georadarowe z Kasprowego Wierchu, Panu Prezesowi Andrzejowi Samburze i Leszkowi Litwinowi z Instytutu Systemów Przestrzennych i Katastralnych (ISPIK) w Gliwicach – za stworzenie warunków i pomoc w realizacji badań do ekspertyzy geotechnicznej na potrzeby przebudowy Kolei Linowej na Kasprowy Wierch.*

*W Szwecji pomocą służyli mi Terry Calahan i Christer Jonasson, którym wdzięczny jestem za życzliwość i otwartość w dostępie do potencjału Naukowej Stacji Badawczej ANS w Abisko. Dziękuję również za pomoc personelowi stacji naukowej w Tarfala. Panowie Peter Jansson i Gunhild Rosqvist-Ninis zorganizowali mój pobyt w tym miejscu. Z obu wymienionych stacji uzyskałem omawiane w pracy dane meteorologiczne. Dane meteorologiczne otrzymałem także z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – obserwatorium na Kasprowym Wierchu, a z Łomickiego Szczytu – dane udostępnił mi Slovenský Hydrometeorologický Ústav. Dzięki uprzejmości pracowników Instytutu Geofizyki Polskiej Akademii Nauk korzystałem z danych polskiej stacji badawczej na Spitsbergenie. Dane meteorologiczne czerpałem również z internetowej witryny National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Pilotom helikopterów Kallax Flyg i obsłudze PKL Kasprowy Wierch dziękuję za elastyczność w kwestii transportu osób i sprzętu. Dziękuję także Murmańskiemu Instytutowi Biologii Morza, którego pracownik Maksim Mitjajew udostępnił mi niektóre dane meteorologiczne dotyczące Dalnych Zelencow. Dzięki cennym sugestiom Ani Gan moja rozprawa przybrała ostateczny kształt.*

*Żonie Gabrysi wdzięczny jestem za cierpliwość i wsparcie, Rodzicom zaś – za wszystko.*

*Praca została wykonana w ramach realizacji projektów: Warunki graniczne i czasowo-przestrzenna zmienność występowania permafrostu w górskim środowisku peryglacjalnym wybranych obszarów Tatr, Laponii i Spitsbergenu na podstawie badań geofizycznych i klimatycznych. N306 052 32/3405, finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, oraz EU ATANS Grant (Fp6 506004): Spatial occurrence and geophysical characteristics of permafrost of Abisko area, Lappland, Sweden and Kasprowy Wierch, Tatra Mts., Poland. Comparative study, finansowanego przez Szwedzką Akademię Nauk, a także w ramach umowy ISPIK-PKL.*

**Permafrost in selected areas  
of the Tatra mountains, the Scandinavian mountains and Spitzbergen  
in the light of extensive geophysical studies and climatological analyses**

S u m m a r y

The investigation of the incidence of permafrost in the mountains began only about 60 years ago, whereas more intensive and systematic research started 30 years ago. Because of the fact that no synthetic publication in Polish devoted to this phenomenon has been released for the last 40 years, the very book is two-fold in nature out of necessity. The first part presents the state of knowledge on permafrost. Its aim is to show the state of the research on permafrost. It aims at presenting the state of the studies on permafrost from the author's critical point of view, as well as forming the basis for the presentation of the research results. The second part involves the results of the research conducted in selected area, as well as their interpretation, analysis and observed regularities.

Permafrost is a thermophysical state of the ground, a phenomenon somehow having a „hidden” nature because it is defined as a thermic state of lithosphere, which in order to be covered with permafrost, must remain in the temperature of 0 Centigrades or less for minimum 2 years. The presence of permafrost does not have to be manifested in the form of a ground ice or sculpture typical of a permanently frozen ground. Because of the fact that its detection is difficult, and it can also be found in unavailable places and such areas where its incidence is a big surprise, one has to admit that its distribution in the Earth has not been fully investigated, especially in the mountains.

The main aim of this work is to detect and observe the regularities of the incidence of permafrost in the mountain, subarctic and subpolar regions, in selected areas between 49 and 77 degrees north, with the use of geophysical and climatic methods. Yet another aim is to investigate its nature, qualities and changeability, depending on the centre of incidence, as well as relations with glaciers under the circumstances of a changing climate.

The studies on the incidence of permafrost in selected areas of the Tatra mountains, the Scandinavian mountains and Spitzbergen, were conducted by

means of a climatic method based on the analysis of freezing and thawing indices, as well as geophysical methods. The latter included direct methods: uncovering and monitoring of the temperature of the ground, and indirect ones: vertical electroresistivity sounding (VES), electroresistivity tomography, electromagnetic method, refraction seismics, and ground penetrating radar.

On the basis of the analysis of freezing and thawing indices it was established that all places under investigation have experienced climate warming in several or several dozen recent years. Unfavourable conditions for maintaining permafrost, however, do not mean an immediate and total degradation, but first its temperature increase and then thickness decrease.

As a result, the work describes the regularities in the incidence of a periglacial permafrost in selected places, such as age, origin, evolution and form of appearance. On the basis of the results of field studies, approximate calculations and analogies in the incidence of permafrost in the mountains of northern Scandinavia and western Siberia, one can draw the following conclusions and hypotheses:

Permafrost is a *thermic state* of a lithosphere, which is why it can only cover the process of freezing -degradation or thawing -degradation. The freezing process covering lithosphere leads to the formation of two types of permafrost: the one that appears in a periglacial environment, which can be called a periglacial or classic permafrost, and a glacial permafrost. The glacial permafrost appears in glaciers and icecaps. In the areas under investigation permafrost appears in the form of a ground ice, dry permafrost, a cryotic state, as well as a freezing form, and “cold” surface ice-layer in glaciers.

Abisko is a place where the two types of an active permafrost meet at the same geographical latitude: a mountain permafrost takes place over an arctic permafrost, appearing in peat bogs on a lower height. Probably, the arctic permafrost can be found both in an

active and non-active form where it is easier to penetrate the cold.

Both in the Tatra mountains and the mountains near Abisko there have never been such conditions in the whole Holocene that would allow for a total degradation of permafrost which developed in these places in the last stage of the Pleistocene most probably. As a result, it is very likely that, like in western Siberia, permafrost appears in the form of two layers both in the Tatra mountains, as well as in the mountains near Abisko. The layers constitute a shallower and younger at the same time, being the result of the contemporary climate, and a deeper and fossil one, referring to

earlier geological periods in its origin. Both layers can overlap with each other partially. One cannot exclude the situation in which such a regularity also appears in other places in the Scandinavian mountains, as well as in other mountain chains where the climate fluctuation would take place.

The lack of the studies on a fossil permafrost lying under a contemporary permafrost or at a substantial depth beyond it, in the areas where the current climate does not facilitate the existence of the contemporary permafrost probably results in a substantial underestimation of the scope of its appearance. It concerns both a mountain and an arctic permafrost formed till the end of the Pleistocene.

## Mehrjähriger Dauerfrostboden auf ausgewählten Gebieten des Tatra-Gebirges, des Skandinavischen Gebirges und Spitzbergens angesichts der komplexen geophysischen Untersuchungen und klimatologischen Analysen

### Zusammenfassung

Mit den Forschungen über den mehrjährigen Dauerfrostboden in der Gebirgsumgebung wurde erst vor 60 Jahren begonnen und intensivere u. systematische Forschungsarbeiten werden erst seit 30 letzten Jahren geführt. Da es seit 40 Jahren keine synthetische Publikation zu diesem Thema in Polnisch veröffentlicht wurde, muss die vorliegende Arbeit gezwungenermaßen zweiteilig sein. Im ersten Teil werden der heutige Stand des Wissens vom mehrjährigen Dauerfrostboden aus der Sicht des Verfassers gezeigt; der zweite Teil beinhaltet die Ergebnisse der von den letztgenannten durchgeführten Untersuchungen, deren Interpretation und die von ihm aufgedeckten Gesetzmäßigkeiten.

Der mehrjährige Dauerfrostboden – Permafrost, ist ein thermophysischer Stand des Bodens, ein Phänomen mit einem sozusagen „versteckten“ Charakter, denn er ist ein thermischer Stand der Lithosphäre, welche – um mit mehrjährigem Dauerfrostboden bedeckt werden zu können – mindestens zwei Jahre lang der Temperatur  $0^{\circ}\text{C}$  oder niedrigerer ausgesetzt werden muss. Der Permafrost kommt nicht immer als Bodeneis oder die für den Dauerfrostboden charakteristischen Reliefformen vor. Da er schwer zu entdecken ist und auch unerwartet an unerreichbaren Stellen auftreten kann, muss man annehmen, dass seine Verteilung auf der Erde und besonders im Gebirge bis heute noch nicht völlig bekannt ist.

Das Hauptziel der Arbeit ist, den mehrjährigen Dauerfrostboden in der Gebirgsumgebung und in subarktischer u. subpolarer Umgebung an ausgewählten auf der geografischen Breite zwischen  $49$  und  $77^{\circ}\text{N}$  liegenden Stellen mit geophysischen und klimatologischen Methoden aufzuspüren und die Regelmäßigkeiten dessen Auftretens nachzuweisen. Das nächste Ziel ist, die Natur und die Eigenschaften des Dauerfrostbodens je nach dem Ort dessen Auftretens und seine Beziehungen zum Gletscher bei wechselhaften klimatologischen Bedingungen zu erkennen.

Die Forschungen wurden auf ausgewählten Gebieten des Tatra-Gebirges, des Skandinavischen Gebirges

und Spitzbergens durchgeführt. Es wurden dabei die, auf der Analyse von Zufrierens- und Auftauensindikatoren (*freezing & thawing indices*) beruhende klimatologische Methode und geophysische Methoden angewandt. Unter den letztgenannten waren mittelbare Methoden – der Tagebau und die Überwachung von der Bodentemperatur, und unmittelbare Methoden: *vertical electroresistivity sounding (VES)*, *electroresistivity tomography*, *electromagnetic method*, *refraction seismics* und *ground penetrating radar*.

Nach der Analyse von Zufrierens- u. Auftauensindikatoren wurde festgestellt, dass es in den letzten einigen Jahren – ein paar Jahrzehnten an allen untersuchten Stellen zu bedeutender Klimaerwärmung gekommen ist. Solche ungünstige Bedingungen haben aber keine sofortige und völlige Degradation des Permafrostes zur Folge; sie verursachen zuerst, dass seine Temperatur erhöht und seine Dichtigkeit vermindert werden.

In der Arbeit werden einige Gesetzmäßigkeiten des Auftretens vom periglazialen Permafrost auf den untersuchten Gebieten, d.h.: Alter, Genese, Weiterentwicklung und Art u. Weise beschrieben.

Die Feldforschungen, Schätzungsberechnungen und die Analogien zwischen dem im Gebirge des Nordskandinaviens und des Westsibiriens auftretenden Permafrostes lassen folgende Schlussfolgerungen ziehen und folgende Hypothesen aufstellen:

Mehrjähriger Dauerfrostboden ist ein *thermischer Stand* der Lithosphäre, die nur durchgefroren (Agradation) oder aufgetaut (Degradation) werden kann. Das Durchfrieren der Lithosphäre verursacht die Entstehung von zwei Arten des mehrjährigen Dauerfrostbodens: des periglazialen (auch klassisch genannter) und glazialen. Der glaziale Permafrost kommt in Gletschern und im Inlandeis vor. Auf den untersuchten Gebieten hat er die Form von: Bodeneis, trockenem Permafrost, Kryozustand, durchgefrorener „kalter“ Schicht unter der Gletscheroberfläche.

In der Umgebung von Abisko treffen sich unter derselben geografischen Breite zwei Arten des akti-

ven Permafrostes zusammen: der Gebirgspermafrost befindet sich über dem arktischen Permafrost, der in niedrigeren Schichten des Torfmoors vorkommt. Der arktische Permafrost kommt wahrscheinlich sowohl in aktiver, als auch nicht aktiver Form vor an den Stellen, wo die Durchdringung der Kälte leichter ist.

Sowohl in Tatra-Gebirge, wie auch im Gebirge in der Umgebung von Abisko gab es zur Zeit des Holozäns nie solche klimatische Bedingungen, welche eine völlige Degradation des hier höchstwahrscheinlich in der Endphase des Pleistozäns entwickelten Permafrostes hätten möglich gemacht. Deshalb kommt der Permafrost in Tatra-Gebirge und im Skandinavischen Gebirge in der Umgebung von Abisko, ebenso wie in Westsibirien in Form von zwei Schichten vor: der flacherliegenden und zugleich jüngeren Schicht – Ergeb-

nis des heutigen Klimas und der tieferliegenden, fossilen Schicht, welche aus früheren Erdzeitaltern stammt. Die beiden Schichten können sich teilweise überlagern. Es ist nicht ausgeschlossen, dass solche Regelmäßigkeit auch andere Stellen des Skandinavischen Gebirges und andere Gebirgsketten, wo es Klimaschwankungen gab, betrifft.

Fehlende Forschungen über den fossilen Permafrost, der unter dem gegenwärtigen Permafrost oder viel tiefer auf den für den gegenwärtigen Permafrost klimaungünstigen Gebieten liegt, sind die Ursache dafür, dass die Reichweite des Vorkommens von dem fossilen Permafrost höchstwahrscheinlich nicht richtig geschätzt ist. Das betrifft sowohl den Gebirgspermafrost, wie auch den arktischen bis zum Ende Pleistozäns entstandenen Permafrost.