

Stan i współczesne zmiany  
**systemów lodowcowych**  
**południowego Spitsbergenu**  
w świetle badań metodami radarowymi

Prace Naukowe



Uniwersytetu Śląskiego  
w Katowicach  
nr 3536

**Mariusz Grabiec**

Stan i współczesne zmiany  
**systemów lodowcowych**  
**południowego Spitsbergenu**  
w świetle badań metodami radarowymi

Redaktor serii: Nauki o Ziemi  
Mariusz Rzętała

Recenzenci  
Wiesław Ziaja  
Grzegorz Rachlewicz

Publikacja została dofinansowana ze środków projektowych Krajowego Naukowego Ośrodka Wiodącego (KNOW) otrzymanych przez Centrum Studiów Polarnych Uniwersytetu Śląskiego



Krajowy Naukowy  
Ośrodek Wiodący



Centrum  
Studiów  
Polarnych

# Spis treści

Podziękowania / 9

Zestawienie symboli / 13

**Wstęp.** Koncepcja dynamicznego systemu glacialnego  
i jego funkcjonowanie w warunkach zmian klimatu / 19

**1. Sondowania radarowe w studiach systemu glacialnego / 29**

1.1. Geofizyczne podstawy technik radarowych / 30

1.1.1. Równania Maxwella i parametry definiujące właściwości elektryczne ośrodka / 32

1.1.2. Prędkość propagacji fal elektromagnetycznych ( $v$ ) / 34

1.1.3. Straty energii w różnych utworach geologicznych / 34

1.2. Właściwości ośrodków występujących w systemie glacialnym  
wpływające na propagację fal radarowych / 38

1.3. Techniki radarowych sondowań systemów lodowcowych / 44

1.3.1. Typy radarów stosowane w badaniach lodowców / 45

1.3.2. Schemat budowy zestawu radarowego / 46

1.4. Metodyka wykonywania naziemnych sondowań radarowych / 50

1.4.1. Sondowania refleksyjne / 51

1.4.2. Sondowanie w celu określenia prędkości  
propagacji fal radarowych (sondowanie prędkościowe) / 70

1.5. Przetwarzanie i interpretacja danych radarowych / 74

1.5.1. Przetwarzanie wstępne / 76

1.5.2. Przetwarzanie zasadnicze / 79

1.5.3. Interpretacja danych radarowych / 93

1.6. Przegląd zastosowań metod radarowych w badaniach systemu glacialnego / 99

1.6.1. Początki badań radarowych. Sondowania miąższości  
i szacowania objętości lodowców / 99

1.6.2. Badania struktury wewnętrznej lodowców na podstawie sondowań radarowych	/	101
1.6.3. Badania stanu hydrotermalnego lodowców na podstawie sondowań radarowych	/	104
1.6.4. Inne zastosowania metody radarowej	/	106
<b>2. Czynniki warunkujące przestrzenne zróżnicowanie depozycji śniegu na obszarach zlodowaconych (na przykładzie Lodowca Hansa)</b>	<b>/</b>	<b>107</b>
2.1. Znaczenie pokrywy śnieżnej		
w świetle obserwowanych zmian środowiskowych	/	107
2.2. Warunki meteorologiczne determinujące akumulację śniegu w obszarze badań	/	109
2.3. Metodyka badań zmienności przestrzennej pokrywy śnieżnej		
oraz dane wejściowe	/	113
2.3.1. Wskaźniki topograficzne	/	114
2.3.2. Numeryczny model terenu	/	116
2.3.3. Waga kierunkowa wskaźników topograficznych	/	117
2.3.4. Dane anemologiczne i ekstrapolacja przestrzenna kierunku wiatru	/	119
2.3.5. Dane miąższości pokrywy śnieżnej	/	121
2.3.6. Znormalizowane wartości miąższości śniegu	/	127
2.4. Dystrybucja śniegu na Lodowcu Hansa na podstawie sondowań radarowych	/	128
2.5. Przestrzenna klasyfikacja predyspozycji akumulacji śniegu		
na podstawie wskaźników topograficznych	/	131
2.6. Analiza przestrzennej zmienności miąższości śniegu		
w sezonach 2011—2014 a modele warunków akumulacji	/	138
2.7. Porównanie warunków depozycji na podstawie wskaźników topograficznych	/	144
2.8. Analiza przydatności wskaźników topograficznych		
dla prognozowania/rekonstrukcji warunków akumulacji śniegu	/	148
2.9. Prawidłowości dystrybucji śniegu na Lodowcu Hansa	/	150
2.10. Czasoprzestrzenna zmienność akumulacji śniegu		
w relacji do warunków meteorologicznych	/	152
2.11. Stabilność oraz zmienność stanu pokrywy śnieżnej	/	152
2.12. Dysproporcje w przestrzennej dystrybucji śniegu		
a zmiany geometrii powierzchni lodowca	/	154
2.13. Prawidłowości depozycji śniegu na Lodowcu Hansa — podsumowanie	/	156
<b>3. Firn i jego rola we współczesnym systemie glacialnym na przykładzie Lodowca Hansa</b>	<b>/</b>	<b>159</b>
3.1. Definicja firnu i procesy kształtujące jego właściwości	/	159
3.2. Rola firnu w funkcjonowaniu systemu glacialnego	/	160
3.2.1. Retencja wody	/	160
3.2.2. Wtórne zamarzanie wody	/	162
3.3. Aktualne problemy badań firnu	/	163
3.4. Metody badań firnu na Lodowcu Hansa	/	166
3.4.1. Płytkie wiercenia lodowe w strefie akumulacji lodowca	/	166
3.4.2. Naziemne sondowania radarowe (GPR)	/	167

3.4.3. Identyfikacja stref glacialnych na obrazie radarowym SAR oraz walidacja na podstawie sondowania GPR	/ 170
3.4.4. Pomiary i modelowanie temperatury wierzchniej warstwy lodowca	/ 178
3.4.5. Kalkulacja zasilania wewnętrznego lodowca	/ 183
<b>3.5. Zasięg firnu w przestrzennej dystrybucji stref glacialnych na Lodowcu Hansa</b>	<b>/ 188</b>
3.5.1. Wydzielenie stref glacialnych na podstawie obrazów SAR	/ 188
3.5.2. Określenie facji lodowcowych na podstawie analizy i interpretacji naziemnych sondowań radarowych	/ 191
3.5.3. Porównanie wyników SAR i GPR	/ 196
3.6. Struktura i właściwości firnu na podstawie analizy rdzenia z odwiertu	/ 198
3.7. Miąższość firnu aktywnego	/ 199
3.8. Temperatura firnu	/ 201
3.9. Wtórne zasilanie lodowca	/ 202
<b>3.10. Właściwości firnu na Lodowcu Hansa — podsumowanie</b>	<b>/ 211</b>
<b>4. Ewolucja hydrotermalna lodowców południowego Spitsbergenu</b>	<b>/ 213</b>
4.1. Cechy struktury termalnej lodowców Spitsbergenu	/ 214
4.2. Potencjalne kierunki zmian struktury hydrotermalnej w warunkach ocieplenia klimatu	/ 216
4.3. Metody i obszar badań struktury hydrotermalnej lodowców	/ 218
4.4. Struktura hydrotermalna lodowców południowego Spitsbergenu w świetle sondowań radarowych	/ 223
4.5. Lodowce na różnych etapach ewolucji hydrotermalnej	/ 228
4.6. Symulacja adaptacji struktury hydrotermalnej do współczesnych warunków klimatycznych na przykładzie Lodowca Hansa	/ 234
4.7. Projekcja zmian struktury hydrotermalnej lodowca wskutek ocieplenia	/ 238
4.8. Wrażliwość symulacji ewolucji struktury hydrotermalnej na zmianę parametrów	/ 240
4.9. Uwarunkowania i skutki środowiskowe zmian struktury hydrotermalnej lodowców	/ 243
<b>4.10. Stan i ewolucja reżimu termalnego — podsumowanie</b>	<b>/ 248</b>
<b>5. Wpływ zmian geometrii lodowców południowego Spitsbergenu na system drenażu subglacialnego</b>	<b>/ 251</b>
5.1. Drenaż podlodowcowy — zagadnienia badawcze	/ 251
5.2. Zmiany geometrii lodowców na południowym Spitsbergenie od małej epoki lodowej (MEL) oraz charakterystyka obiektów badawczych	/ 254
5.3. Metody aproksymacji dróg spływu podlodowcowego	/ 258
5.4. Wrażliwość modeli drenażu podlodowcowego oraz potencjalne skutki zmian geometrii i współczynnika ciśnienia subglacialnego	/ 261
5.5. Wyniki modelowania sieci drenażu podlodowcowego	/ 263
5.6. Miejsca wypływów wód subglacialnych — porównanie obserwacji i modeli	/ 266

5.7. Pozostałe przesłanki świadczące o funkcjonowaniu systemu drenażu subglacjalnego	/ 275
5.8. Krążenie wód subglacjalnych w przegłębionych fragmentach dolin lodowcowych	/ 279
5.9. Uzyskane wyniki a rezultaty wcześniejszych badań drenażu subglacjalnego	/ 281
5.10. Wpływ zmian geometrii lodowców na sieć spływu podlodowcowego	/ 282
5.11. Funkcjonowanie drenażu subglacjalnego w warunkach recesji lodowców — podsumowanie	/ 286
<b>6. Reakcja lodowców południowego Spitsbergenu na zmieniające się warunki środowiskowe, kierunki ewolucji systemu glacialnego — wnioski</b>	<b>/ 289</b>
Bibliografia	/ 303
Summary	/ 326
Zusammenfassung	/ 327



## Podziękowania

Zebranie materiału i dokonanie jego analizy na potrzeby tej pracy było złożonym i długotrwałym procesem. Powodzenie tych studiów nie byłoby możliwe bez pomocy i zaangażowania wielu osób i instytucji, którym na wstępie chciałbym serdecznie podziękować.

Podjęcie rozwiązania problemu badawczego zdefiniowanego w tej książce zrodziło się dzięki twórczej dyskusji z prof. Jackiem Janią. Za sprawą jego otwartości na nowatorskie techniki badawcze oraz nieszablonowe sposoby wykonywania badań możliwe było prowadzenie oryginalnych prac i stawianie śmiałych hipotez. Jestem wdzięczny za nieustanne stymulowanie do poszukiwania odpowiedzi na nurtujące badaczy Arktyki pytania oraz wszystkie życzliwe uwagi, sugestie i komentarze.

Pozyskanie materiału wymagało spędzenia wielu miesięcy w terenie i pozwalało na współpracę z jedynymi w swoim rodzaju, bezinteresownymi pasjonatami obszarów polarnych, których pomoc była nieoceniona. Dziękuję wszystkim, z którymi współpracowałem w terenie, uczestnikom wypraw polarnych Polskiej Akademii Nauk, Uniwersytetu Śląskiego i Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej. Kilka osób szczególnie przyczyniło się do zebrania materiału terenowego. Pragnę podziękować prof. Piotrowi Głowackiemu za pomoc logistyczną w przygotowywaniu kolejnych wypraw na Spitsbergen, udostępnienie licznych danych środowiskowych z rejonu Hornsundu, znajdujących się w zbiorach Instytutu Geofizyki Polskiej Akademii Nauk (zwłaszcza danych meteorologicznych i bilansu masy), oraz udostępnienie sprzętu radarowego. Darkowi Puczcze za setki kilometrów wspólnych sondowań radarowych, zapewnienie bezpieczeństwa logistycznego w terenie oraz przekazanie danych glaciologicznych i meteorologicznych. Pragnę wyrazić wdzięczność Tomaszowi Budzikowi — kompanowi niemal wszystkich moich ekspedycji na Spitsbergen. Dziękuję mu również za opracowanie i udostępnienie danych pozyskanych z pomiarów meteorologicznych Uniwersytetu Śląskiego na lodowcach otoczenia Hornsundu. Dariuszowi Ignatiukowi pragnę podziękować za niezawodne wsparcie w operacjach terenowych, współpracę i pomoc w każdych warunkach.

Grzegorzowi Gajkowi dziękuję za wspólne badania, zwłaszcza w rejonie Stacji Polarnej Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Calypsobyen.

Liczne dane udostępnione mi przez osoby i instytucje znacznie wzbogaciły materiał tego opracowania. Dziękuję zwłaszcza Michałowi Lasce za przekazanie danych z analizy profili śnieżnych i prof. Krzysztofowi Migale za dane z rdzenia lodowego. Dane meteorologiczne z Polskiej Stacji Polarnej w Hornsundzie zostały pobrane z platformy [www.glacio-topoclim.org](http://www.glacio-topoclim.org) lub bezpośrednio z bazy danych Instytutu Geofizyki PAN. Dane satelitarne ERS SAR zostały pozyskane w ramach projektu Europejskiej Agencji Kosmicznej nr C1P.9630. Małgorzacie Błaszczyk jestem wdzięczny za poświęcony czas i cierpliwość w szkoleniu i przetwarzaniu danych SAR, udostępnienie materiałów kartograficznych oraz cenną dyskusję nad rozdziałem 3.

Koncepcja pracy i jej ostateczny kształt są wynikiem dyskusji prowadzonych z wieloma życzliwymi i kompetentnymi osobami. Zwłaszcza dziękuję Wojciechowi Dobińskiemu za komentarze do książki, natomiast Barbarze Barzyckiej jestem wdzięczny za korektę.

Wnikliwy przegląd, trafne uwagi i inspirujące komentarze ze strony recenzentów: prof. dr. hab. Wiesława Ziaji oraz dr. hab. prof. UAM Grzegorza Rachlewicza, pozwoliły nanieść istotne poprawki, które znacznie podniosły walory merytoryczne książki i ulepszyły formę przekazu. Konsultacji i cennych opinii w zakresie metodyki sondowań georadarowych udzielił dr inż. Łukasz Ortyl z Katedry Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie.

Studia zaprezentowane w książce zostały sfinansowane i przeprowadzone w ramach realizacji projektu Programu Polsko-Norweskiej Współpracy Badawczej (Pol-Nor/198675/17/2013) „Arctic climate system study of ocean, sea ice and glaciers interactions in Svalbard area” — AWAKE-2 w latach 2013—2016. Prace badawcze, których rezultaty przedstawiono w prezentowanej publikacji, prowadzono w latach 2007—2014 dzięki finansowaniu udzielonemu w ramach projektów:

- ♦ „Sensitivity of Svalbard glaciers to climate change — SvalGlac” — projekt w ramach European Science Foundation realizowany w latach 2010—2013;
- ♦ „Arctic Climate and Environment of the Nordic Seas and the Svalbard — Greenland Area (AWAKE)” — projekt Programu Polsko-Norweskiej Współpracy Badawczej PNRF-22-AI-1/07 prowadzony w latach 2009—2011;
- ♦ „ice2sea — estimating the future contribution of continental ice to sea-level rise” — project 7 Ramowego Programu UE FP7-ENV-2008-1 prowadzony w latach 2009—2012;
- ♦ „Zmienność wybranych elementów środowiska polarnego w Atlantyckim sektorze Arktyki określona na podstawie badań prowadzonych w trzech stacjach bazowych oraz na wybranych obszarach Svalbardu w okresie pomiędzy 3 MRG 1957—1958 a 4 MRP 2007—2009 — KINNVIKA” — projekt specjalny IPY/279/2006 realizowany w latach 2007—2010;

- ♦ „Dynamiczna odpowiedź lodowców Svalbardu na zmiany klimatu i jej skutki środowiskowe — GLACIODYN” — projekt specjalny IPY/269/2006 wykonywany w latach 2007—2010.

Końcowy etap przygotowania publikacji dofinansowany został ze środków projektowych Krajowego Naukowego Ośrodka Wiodącego (KNOW) otrzymanych przez Centrum Studiów Polarnych na lata 2014—2018.

Żonie Oli dziękuję za cierpliwość oraz wsparcie, bez którego książka ta nigdy by nie powstała.

## Zestawienie symboli

- $a, b$  — półosie elipsy śladu pokrycia (strefy Fresnela)
- $A_t$  — amplituda z poszczególnych próbek trasy w określonym oknie czasowym
- $b_c$  — akumulacja z zamarzania wody kapilarnej
- $b_i$  — akumulacja wewnętrzna
- $b_{isf}$  — suma zasilania wewnętrznego poniżej poziomu  $H_{sf}$  w ciągu roku bilansowego — stan na koniec okresu ablacyjnego
- $\bar{b}_i$  — średnia akumulacja wewnętrzna
- $\bar{b}_n$  — średni bilans masy lodowca netto
- $b_p$  — akumulacja z zamarzania wody perkolującej
- $b_{psf}$  — akumulacja wewnętrzna wód perkolacyjnych poniżej poziomu  $H_{sf}$
- $b_w$  — bilans zimowy lodowca
- $\bar{b}_w$  — średni powierzchniowy bilans zimowy lodowca
- $\vec{B}$  — wektor indukcji magnetycznej [T]
- $c$  — prędkość propagacji fali elektromagnetycznej w próżni ( $2,99 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ )
- $C_p$  — ciepło właściwe lodu
- $d_h$  — głębokość zalegania sondowanego obiektu
- $d_{max}$  — maksymalna głębokość penetracji fal radarowych
- $\vec{D}$  — wektor indukcji elektrycznej [ $\text{C m}^2$ ]
- $DDF$  — indeks temperaturowy (*degree day factor*)
- $\vec{E}$  — wektor natężenia pola elektrycznego [ $\text{V m}^{-1}$ ]
- $E_\psi^\eta$  — indeks ekspozycji dla kierunku  $\psi$  i odległości  $\eta$  od punktu pomiarowego
- $f$  — częstotliwość fali
- $f_c$  — częstotliwość centralna anteny
- $f_t$  — materiałowa częstotliwość przejścia
- $g$  — przyspieszenie ziemskie

$h$	— głębokość
$h_i$	— miąższość lodu
$h_{\max}$	— głębokość dolnej granicy firnu aktywnego
$h_p$	— wysokość nad poziomem morza punktu pomiarowego
$h_{xi}$	— wysokość nad poziomem morza punktu węzłowego $i$ w kierunku $\Psi$ , oddalanego od punktu pomiarowego o dystans $x$ nie większy niż maksymalny wektor $\eta$ (zwany wektorem przeszukiwania)
$H_0$	— maksymalna głębokość występowania temperatury topnienia pod ciśnieniem pod koniec sezonu zimowego
$\bar{H}$	— wektor natężenia pola magnetycznego [ $A\ m^{-1}$ ]
$H_a$	— obniżenie powierzchni lodowca wskutek ablacji powierzchniowej
$H_h$	— dane miąższości śniegu znormalizowane względem średniej miąższości śniegu w strefie wysokościowej wokół punktu pomiarowego
$H_r$	— normalizacja danych miąższości śniegu oparta na równaniach regresji liniowej
$H_s$	— dane miąższości śniegu znormalizowane względem średniej miąższości śniegu z punktów w otoczeniu
$H_{sf}$	— głębokość granicy śniegu i firnu
$IRE$	— siła odbicia wewnętrznego ( <i>internal reflection energy</i> ) [dB]
$\bar{J}$	— gęstość prądu elektrycznego [ $A\ m^{-2}$ ]
$k$	— współczynnik przewodności cieplnej ośrodka [ $W\ m^{-1}\ K^{-1}$ ] (indeks dolny odnosi się do ośrodka, którego przewodność dotyczy: $i$ — lód)
$k_{\text{eff}}$	— przewodność efektywna śniegu
$k_p$	— współczynnik (w zakresie 0—1) ciśnienia subglacjalnego
$L$	— utajone ciepło przemian fazowych wody ( $333700\ J\ kg^{-1}$ )
$n$	— liczba obserwacji
$p$	— poziom istotności statystycznej
$p_f$	— porowatość firnu
$P_w$	— ciśnienie wód subglacjalnych wywierane nadkładem lodu
$P_z$	— potencjał energii wody wynikający z wysokości punktu ponad poziomem odniesienia (potencjał topograficzny)
$q$	— gęstość ładunku elektrycznego [ $C\ m^{-3}$ ]
$Q$	— strumień ciepła
$r$	— współczynnik korelacji
$R$	— współczynnik odbicia Fresnela
$R^2$	— współczynnik determinacji
$RH$	— wilgotność względna
$sd$	— odchylenie standardowe
$S$	— parametr maksymalnego nachylenia w kierunku wiatru (indeks dolny: $\Psi$ — odnosi się do kierunku wiatru, dla którego

parametr jest definiowany;  $\eta$  — określa dystans od punktu pomiarowego, na podstawie którego parametr został obliczony)

$ST$	— liczba uśrednień tras
$S_a$	— odległość pomiędzy modułami anteny: nadawczym i odbiorczym
$S_{wi}$	— nasycenie wodą nieredukowalną
$t$	— czas [s]
$t_n$	— czas wystąpienia ramienia hiperboli na trasie $x_n$
$t_0$	— czas wystąpienia wierzchołka hiperboli na trasie $x_0$
$t_1, t_2$	— czas wystąpienia fali odbitej w gruncie przy dystansie pomiędzy antenami w pozycjach odpowiednio: 1 i 2 (porównaj ryc. 1.17a)
$tw_1, tw_2$	— czas powrotu fali definiujący górny i dolny zakres okna czasowego, dla którego wyznaczany jest wskaźnik <i>IRE</i>
$T$	— temperatura (indeks dolny odnosi się do ośrodka, którego przewodność dotyczy: a — powietrze)
$TW$	— okno czasowe ( <i>time window</i> )
$T_d$	— temperatura punktu rosy
$T^+$	— pozytywne stopniodni
$u_m$	— średnia prędkość wiatru
$u_r$	— prędkość wiatru na poziomie referencyjnym $z_r$
$u^*$	— prędkość ścinająca wiatru
$v$	— prędkość propagacji fali (indeks dolny identyfikuje kolejną warstwę lub ośrodek, którego dotyczy: g — lodowiec)
$V_{N-S}$	— średnia równoleżnikowa składowa wiatru
$V_{W-E}$	— średnia południkowa składowa wiatru
$W_w$	— ważony współczynnik wiatru
$x_n$	— odległość $n$ -tej trasy obejmującej ramię hiperboli od początku profilu
$x_v$	— rozdzielczość wertykalna sondowania radarowego
$x_0$	— odległość trasy obejmującej wierzchołek hiperboli od początku profilu
$x_1, x_2$	— dystans pomiędzy antenami w dwóch położeniach odpowiednio: 1 i 2 (porównaj ryc. 1.17a)
$z$	— odległość
$z_p$	— wysokość nad poziomem morza punktu pomiarowego
$z_r$	— referencyjna wysokość pomiaru prędkości wiatru
$z_w, z_e, z_s, z_n, z_{nw}, z_{sw}, z_{ne}, z_{se}$	— wysokości nad poziomem morza punktów węzłowych położonych w odległości $\eta$ od punktu pomiarowego w kierunkach W, E, S, N, NW, SE, SW, NE
$z_0$	— szorstkość powierzchni śniegu

$Z_B$	— wysokość podłoża lodowca
$Z_S$	— wysokość powierzchni lodowca
$\bar{z}_\Psi^n$	— średnia wysokość terenu w kierunku $\Psi$ i odległości od punktu pomiarowego $\eta$
$\alpha$	— współczynnik tłumienia [ $\text{dB m}^{-1}$ ]
$\beta$	— kąt nachylenia stoku mierzony wzdłuż jego największego spadku
$\gamma_s, \gamma_c$	— wagi odpowiednio $\Omega_s$ i $\Omega_c$ przyjmujące wartości pomiędzy 0 a 1, których suma zawsze wynosi 1
$\Delta b$	— zmiana miąższości lodowca na skutek bilansu masy
$\Delta e$	— składowa pionowa prędkości lodu
$\Delta t$	— interwał czasu (np. pomiędzy kolejnymi wyzwoleniami, rejestracją impulsów GPR, obserwacjami)
$\Delta T$	— zmiana temperatury z głębokością/wysokością
$\Delta T_h$	— wzrost temperatury firnu na głębokości $h$
$\Delta x$	— odległość pomiędzy antenami
$\Delta x_s$	— odległość pomiędzy punktem pomiarowym a punktem węzłowym $i$ w kierunku $\Psi$
$\Delta z$	— migracja (zmiana głębokości) płaszczyzny oddzielającej warstwę lodu zimnego i umiarkowanego (CTS)
$\varepsilon$	— przenikalność elektryczna [ $\text{F m}^{-1}$ ]
$\varepsilon_r$	— względna przenikalność elektryczna (indeks dolny identyfikuje kolejną warstwę lub ośrodek, którego dotyczy: i — lód, w — woda, g — lodowiec, gw — lodowiec zawierający wodę, d — mieszanina dwuskładnikowa)
$\varepsilon_0$	— przenikalność elektryczna w próżni ( $8,8542 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$ )
$\eta$	— dystans od punktu pomiarowego, na podstawie którego określone zostały wskaźniki topograficzne $S$ , $E$ oraz $W_w$
$\theta_{mi}$	— zawartość wody nieredukowalnej
$\Theta$	— udział objętościowy składowej (indeks dolny definiuje składową: i — lód, w — woda)
$\Theta_d$	— współczynnik ugięcia kierunku wiatru
$\kappa$	— stała von Kármána (0,4)
$\lambda$	— długość fali
$\mu$	— przenikalność magnetyczna [ $\text{H m}^{-1}$ ]
$\mu_r$	— względna przenikalność magnetyczna
$\xi$	— azymut ekspozycji stoku wyrażony w stopniach ( $0^\circ$ — odnosi się do północy)
$\rho$	— gęstość (indeks dolny odnosi się do ośrodka, którego gęstość dotyczy: i — lód, s — śnieg, f — firn, g — lodowiec, w — woda)
$\sigma$	— przewodność [ $\text{S m}^{-1}$ ]
$\sigma^0$	— współczynnik rozproszenia wstecznego [dB]
$\phi_i$	— kąt padania fali

- $\phi_r$  — kąt odbicia fali
- $\Phi$  — potencjał hydrauliczny
- $\Psi$  — kierunek wiatru; referencyjny kierunek przyjmowany dla wyznaczania wskaźników topograficznych  $S$ ,  $E$  oraz  $W_w$
- $\Psi_m$  — średni kierunek wiatru
- $\Omega_c$  — zakrzywienie powierzchni stanowiące uśrednioną z czterech głównych kierunków (W—E, S—N, NW—SE, SW—NE) różnicę pomiędzy wysokością punktu pomiarowego ( $z_p$ ) i średnią wysokością punktów węzłowych leżących w przyjętej, równej odległości po przeciwległej stronie
- $\Omega_s$  — kąt nachylenia stoku mierzony wzdłuż kierunku wiatru
- $\bar{\nabla}^*$  — operator dywergencji
- $\bar{\nabla} \times$  — operator rotacji



# Wstęp

## Koncepcja dynamicznego systemu glacialnego i jego funkcjonowanie w warunkach zmian klimatu

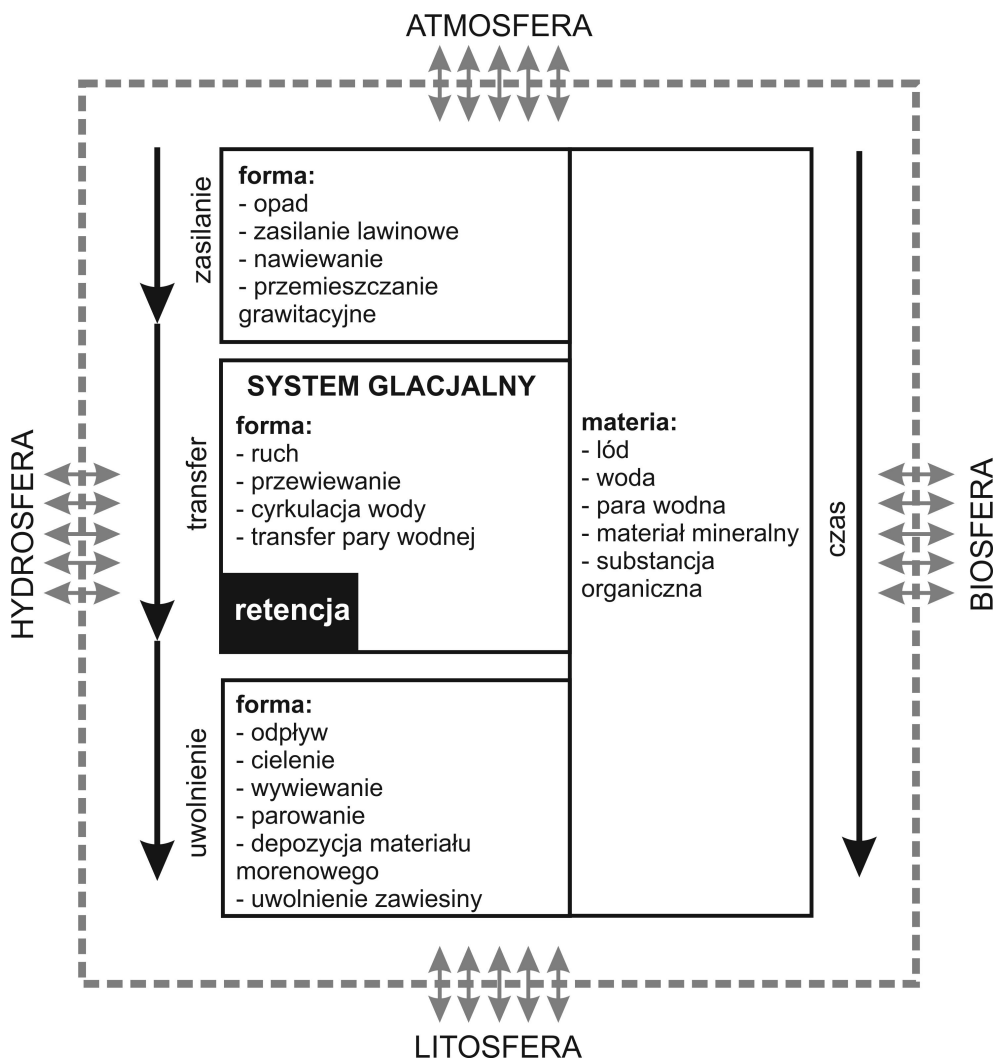
Dla dwóch tych powodów: powszechności i osobliwości, lód gra rolę niezwykle ważną i wyjątkową w gospodarce natury. Jest on siedliskiem całego splotu zjawisk fizycznych i mechanicznych, jest przyczyną, pośrednią lub bezpośrednią, całego łańcucha zmian, na skalę olbrzymią równie jak mikroskopijną, w powietrzu, w wodach, w gruntach.

DOBROWOLSKI 1923, s. II

Sieć sprzężeń zwrotnych w środowisku polarnym niesie ze sobą szereg specyficznych reakcji poszczególnych składowych tego kompleksu na wytrącenie ze stanu równowagi któregośkolwiek z nich. Konsekwencje współczesnych zmian środowiskowych w obszarach zlodowaconych w ogólnym zarysie są znane. Jednakże w cieniu powszechnie opisywanych tendencji recesji lodowców oraz utraty ich masy toczą się procesy kształtujące stan glajotermiczny, metamorfozę lodu, transfer energii i masy we wszystkich trzech stanach skupienia wody. Określenie wzajemnych relacji pomiędzy tymi procesami, a przede wszystkim zdefiniowanie mechanizmów sterujących reakcją systemów lodowcowych na impulsy środowiskowe, stanowi naczelny problem badawczy podejmowany w dalszej części niniejszej rozprawy.

Kriosfera, która jest domeną integrującą wszelkie formy genetycznie związane z obecnością lodu i przemarzniętym gruntem, stanowi jeden z głównych komponentów powierzchni Ziemi. Lód, będąc skałą o najniższej temperaturze topnienia spośród utworów geologicznych powszechnie występujących w skorupie ziemskiej, cechuje się wrażliwością na zmiany temperatury i małą trwałością fazy skupienia. Te właściwości przyczyniają się do tego, że pokrywa lodowa występująca w geologicznej historii Ziemi ciągle balansowała pomiędzy zanikiem a dominacją w krajobrazie naszej planety. Spośród wielu form, które obejmuje definicja kriosfery, lodowce reprezentują najczystsza postać, kształtowaną przez opad atmosferyczny, temperaturę oraz topografię. Złożoność struktury oraz procesów w niej zachodzących skłania do traktowania lodowca jako spójnego kompleksu. Pojęcie „system glacialny” odnosi się zazwyczaj do zespołu zjawisk, form i procesów, których wspólną cechą

jest występowanie lodu lodowcowego (ryc. 0.1). Elementy te funkcjonują w środowisku naturalnym (polarnym, wysokogórskim), powiązane siecią wzajemnych relacji i sprzężeń zwrotnych. Podstawową cechą systemu jest wymiana masy począwszy od zasilania, poprzez jej retencję i transfer wewnętrzny, po utratę (SOUCHEZ i LORRAIN 1991; JANIA 1997; WHITE, MOTTERSHEAD, HARRISON 1998; SINGH, SINGH, HARI-TASHYA, ed. 2011; BENN i EVANS 2010). W tym procesie system dąży do osiągnięcia stanu równowagi (SOUCHEZ i LORRAIN 1991; JANIA 1997). Substancja zasilająca (np. lód, woda, materiał mineralny i organiczny) dostarczana jest w różnych formach (opad, zasilanie lawinowe, nawiewanie, grawitacyjne przemieszczanie i inne). Budulec systemu glacialnego gromadzony jest we wszystkich trzech stanach skupienia zarówno wewnątrz, jak też na powierzchni i poniżej spągu lodowców. Specyficzną właściwością lodowca jest jego ruch. Proces ten to jeden ze sposobów transferu masy wewnątrz systemu glacialnego. Osobną kwestię związaną z przemieszczeniem masy stanowią cyrkulacja wody w środowisku glacialnym oraz transfer w postaci pary wodnej. Wreszcie następuje ostatni etap wymiany masy — jej odprowadzenie poza system. Również tutaj odzwierciedla się złożoność i odmiennosc mechanizmów, wśród których znajduje się m.in. wywiewanie materii poza obręb lodowca, odpływ wód krążących w lodowcu poza system, celenie czół lodowców kończących się w morzu, parowanie z powierzchni lodowców, depozycja materiału mineralnego w postaci moreny, czy też uwolnienie zawiesiny wraz z wodą wypływającą z bramy lodowcowej. Równoległe z wymianą masy w systemie lodowcowym zachodzi transfer energii. Pomiedzy momentem rozpoczęcia działania impulsu zewnętrznego a reakcją systemu mija dany okres definiowany jako czas reakcji (JANIA 1997). Opóźnienie odpowiedzi systemu glacialnego zależy od procesu przetwarzającego inicjalny sygnał. Jak wynika z powyższego opisu, system glacialny jest otwarty i pozostaje w ciągłej interakcji z otaczającymi kompleksami, które tworzą atmosfera, hydrosfera lądowa i morska, litosfera (BENN i EVANS 2010) czy też biosfera (EDWARDS i in. 2014). System wzajemnych powiązań lodowca i otaczających go oraz wzajemnie na siebie wpływających ekosystemów tworzy glaciosystem (TAILLANT 2015). Widzimy zatem, że złożona natura procesów zachodzących w lodowcach oraz ich wewnętrzne i zewnętrzne uwarunkowania wymagają spojrzenia kompleksowego. Stąd też jedyną drogą do zrozumienia zachowania lodowców w świetle współczesnych zmian środowiskowych jest podejście do studiów nad całym systemem, a nie wybiórcze traktowanie każdego komponentu (JANIA 1997; BENN i EVANS 2010). Systemowe spojrzenie badawcze pozwala wyjaśnić mechanizm funkcjonowania „organizmu”, jakim jest lodowiec, oraz dostrzec czasoprzestrzenne relacje składników tego systemu i jego powiązań z czynnikami zewnętrznymi (JANIA 1997). Takie też stanowisko przyjęto w niniejszej pracy. Szczegółowe potraktowanie wybranych elementów systemu glacialnego było narzędziem pozwalającym na uzyskanie kompletnego obrazu mechanizmów reakcji lodowców Svalbardu na zmiany środowiskowe (a zwłaszcza klimatyczne) po zakończeniu małej epoki lodowej (MEL), a nasilające się w ostatnich 2, 3 dekadach.



Ryc. 0.1.

Schemat relacji zachodzących w systemie glacialnym oraz interakcji z otaczającym środowiskiem (szczegóły w tekście; jeśli nie wskazano inaczej wszystkie materiały graficzne i tabele są mojego autorstwa — M.G.)

Fig. 0.1.

The schema of relations in the glacial system and interactions with surrounding environment (see details in the text; unless otherwise indicated, all graphic materials and tables are mine — M.G.)

Zmiany środowiskowe w Arktyce należą do najbardziej spektakularnych na Ziemi. Dotyczą one głównie wzajemnie połączonych przeobrażeń zachodzących w obrębie systemów: klimatycznego oraz oceanicznego. Badania paleoklimatyczne wskazały, iż obszary polarne, również w przeszłości geologicznej, charakteryzowały się większą podatnością na fluktuacje klimatu aniżeli pozostałe obszary Ziemi.

Trend zmian temperatury powietrza w Arktyce był 3-, 4-krotnie wyższy od średniej (MILLER i in. 2010; SERREZE i BARRY 2011). Obecne badania klimatu potwierdzają tę prawidłowość (IPCC 2013; IPCC 2014; PRZYBYŁAK 2015), zwłaszcza w odniesieniu do okresu po 1995 roku (PRZYBYŁAK 2002). W europejskim sektorze Arktyki najbardziej dynamiczne ocieplenie od MEL rejestrowane jest w rejonie Svalbardu. Tempo wzrostu temperatury na Spitsbergenie zostało obliczone na 2,6°C na 100 lat (NORDLI i in. 2014). Intensywność zmian klimatu przekłada się tam na ewolucję i dynamikę całego środowiska polarnego, w tym systemów glacialnych.

Przyczyną intensyfikacji zmian klimatycznych w obszarach wysokich szerokości geograficznych jest obszernie opisywany system sprzężeń zwrotnych zwany wzmocnieniem arktycznym (*Arctic amplification*), którego kluczowym elementem są zmiany w kriosferze (SERREZE i BARRY 2011; GRABIEC 2014). Mechanizm ten rozpoczyna się niewielkim ociepleniem, które prowadzi do zmniejszenia pokrywy lodowej na powierzchni mórz (lód morski) i lądów (lodowce, pokrywa śnieżna, lód jeziorny itd.). W efekcie dochodzi do obniżenia albedo podłoża i wzrostu ilości energii pochłanianej przez powierzchnię czynną. Energia ta następnie jest oddawana do atmosfery (powodując jej ocieplenie) lub transportowana wraz z przemieszczaniem się wód morskich. Szczególnie ten ostatni proces jest efektywny dla wzrostu temperatury w obszarach polarnych. Tendencja do zmniejszania się powierzchni lodu morskiego prowadzi do odsłonięcia większych obszarów oceanu, w których ciepło transportowane z prądami morskimi jest oddawane do atmosfery. Ze względu na występowanie w Arktyce przez większą część roku powierzchni czynnych, których temperatura nie wzrasta powyżej 0°C (śnieg, lodowce), dostarczane ciepło nie może zostać wykorzystane na parowanie. W rezultacie ogrzewana jest bezpośrednio atmosfera, a efekt ten dodatkowo wzmacnia mniejsza miąższość troposfery w obszarach polarnych (ACIA 2004). Opisany cykl powtarzany wielokrotnie prowadzi do intensyfikacji tempa wzrostu temperatury, powodując jednocześnie zmiany w kriosferze całego obszaru, w tym w systemach lodowcowych.

Widocznym skutkiem reakcji zlodowacenia Arktyki na zmiany środowiskowe, manifestującym się negatywnym sprzężeniem zwrotnym, jest trend recesji lodowców oraz ich ujemny bilans masy. Lodowce Svalbardu w latach 1936—1990 zmniejszyły swą powierzchnię o 16% (NUTH i in. 2007) oraz o 7% w ostatnich 30 latach (NUTH i in. 2013). Recesja wiąże się również z utratą masy, której tempo dla lodowców Spitsbergenu w ostatnich 4 dekadach zostało obliczone średnio na  $-9,71 \pm 0,55 \text{ km}^3$  na rok, co stanowi równowartość  $-0,36 \pm 0,02 \text{ m}$  ekwiwalentu wodnego (e.w.) na rok (NUTH i in. 2010). Modelowanie wrażliwości bilansu masy lodowców Svalbardu wskazało, że wzrost temperatury powietrza o 1°C powoduje zmniejszenie bilansu masy w zakresie 0,5—0,8 m e.w. na rok (DOWDESWELL i in. 1995).

Podejście systemowe do badań reakcji kriosfery na zmiany środowiskowe pozwala na pełniejszą analizę zachowań lodowców. Takie studia umożliwiają wyjaśnienie zjawisk glacialnych, które na pozór stoją w sprzeczności do zasadniczego trendu recesji czoł lodowców jako odpowiedzi na ocieplenie klimatu, jak: gwałtowne przy-

spieszenia ich ruchu i awans czoł, zanik lodu umiarkowanego w strukturze lodowców, czy też wzrost zimowego powierzchniowego bilansu masy. Do takich aktywności lodowca zaliczyć można jego szarżę. Zjawisko to objawia się niesynchronicznym awansem czoła lodowca na skutek szybkiego przemieszczenia masy z obszaru alimentacyjnego do ablacyjnego. Szarże lodowcowe są powszechne m.in. na Svalbardzie i mają miejsce na 90% lodowców (LEFAUCONNIER i HAGEN 1991). Na Spitsbergenie znacząca szarża została niedawno odnotowana na lodowcu Nathorstbreen. Faza aktywna trwa od 2008 roku i doprowadziła do zwiększenia powierzchni o ok. 20% na skutek przesunięcia czoła o 15 km (SUND, LAUKNES, EIKEN 2014). Zjawisko szarży początkowo nie było wiązane ze zmianami klimatycznymi (MEIER i POST 1969), jednakże spojrzenie na lodowiec jako system pozwoliło odnaleźć relacje pomiędzy ociepleniem klimatu a bilansem masy, zmianami hydrotermalnymi, dynamiką ruchu lodowca, zawartością i ciśnieniem wody w podłożu (m.in. JANIA 1988; DOWDESWELL i in. 1995; HARRISON i POST 2003).

Poznanie mechanizmów sterujących funkcjonowaniem systemu glacialnego ma dla człowieka znaczenie nie tylko poznawcze, ale jest również istotne z punktu widzenia jego warunków życia. Działalność lodowców przyczyniać się może zarówno do powstawania zagrożeń dla człowieka, jak też do czerpania korzyści z ich aktywności. Woda z obszarów zlodowaconych ma niebagatelne znaczenie dla produkcji „zielonej energii”, rolnictwa, zasobów wody użytkowej (ORLOVE 2009). Jednakże prognozy oraz zmiany reżimu zasilania, a także ilości wody pochodzenia lodowcowego, na skutek ocieplenia klimatu, budzą niepokój naukowców, inżynierów i ekonomistów (np. SCHAEFLI, HINGRAY, MUSY 2007; VERGARA i in. 2007). Jedną z motywacji studiów nad lodowcami jest zrozumienie ich funkcjonowania w celu uniknięcia zagrożeń, które ze sobą niosą. Spośród licznych przejawów niszcycielskiej działalności lodowców, część z wymienionych dalej ma katastrofalny przebieg (za KÄÄB, REYNOLDS, HAEBERLI 2005; ORLOVE 2009). Wiele istnień ludzkich i zniszczeń materialnych pociągają za sobą powodzie spowodowane uwolnieniem wody zretencjonowanej zarówno w obrębie lodowca, jak i ze zbiorników wód pochodzenia glacialnego na przedpolach lodowców. Podobnie niszcycielską siłę mają lawiny lodowe, spływy lodowo-błotne lub lodowo-gruzowe. Dynamiczne zmiany zasięgu lodowców (szarże) mogą prowadzić do zniszczenia różnego typu infrastruktury technicznej. Intensywność zjawisk związanych z tempem utraty masy przez lodowce i kopuły lodowe przekłada się na wzrost poziomu wszechoceanu, który jest w blisko 30% warunkowany dostawą wody z lodowców (GARDNER i in. 2013).

Zrozumienie procesów zachodzących w systemie lodowcowym ma również inny wymiar praktyczny. Przykładem może być tutaj wykorzystanie zjawiska wymiany energii w czasie przemian fazowych wody, które w naturalnych warunkach zachodzi w warstwach lodowca, pozwalających na perkolację wody ablacyjnej. Woda, zamrażając, uwalnia energię, co prowadzi do ocieplenia warstwy lodowca, w której zachodzi ten proces. Topnienie lodu natomiast wymaga dostarczenia energii z otoczenia, skutkując wychłodzeniem. Zatem procesy wymiany ciepła przemian fazowych są jednym z głównych regulatorów termiki lodowców. Zastosowanie energii

zamarzania/rozmarzania lodu jest obecnie wdrażane w zasobnikach wodnych stanowiących alternatywne źródło ciepła dla instalacji pomp ciepła (MIRONOWICZ 2015). W trakcie krzepnięcia wody ciepło przemian fazowych jest pobierane za pomocą wymiennika pompy ciepła, a po zamarznięciu źródło jest regenerowane przez dostarczenie energii z kolektora powietrznego i ciepła gruntu. Warto wspomnieć o wysokiej wydajności tego źródła ciepła. W trakcie zamarzania 10 m<sup>3</sup> wody uzyskiwanych jest 930 kWh energii (PANTERA 2014), co odpowiada energii uzyskanej ze 100 l oleju opałowego (<http://www.energytechnic.pl>). Latem natomiast chłodzenie instalacji na skutek rozmarzania akumulatora wodnego przynosi ulgę w upałach (PANTERA 2014).

Często w odniesieniu do systemów glacialnych stwierdza się, że są one głównymi elementami wskaźnikowymi zmian środowiskowych zachodzących w Arktyce. Książka ma za zadanie wytłumaczyć, jak należy rozumieć sygnały, które płyną z zachowania lodowców poprzez różną ich aktywność. Można postawić hipotezę badawczą, że system glacialny jest buforem impulsów środowiskowych. Ze względu na skomplikowany system powiązań zewnętrznych i wewnętrznych najczęściej reaguje z opóźnieniem i w sposób ewolucyjny. Nie można jednak wykluczyć gwałtownej odpowiedzi systemu lodowcowego w postaci powodzi lodowcowych, lawin błotno-lodowych, katastrofalnych odcięć czoł lodowców, szarż lodowcowych i innych. Celem pracy jest również określenie, w jaki sposób systemy glacialne lodowców Svalbardu reagują na zmieniające się warunki środowiskowe. Pytania dotyczą zarówno formy tej reakcji oraz jej konsekwencji, jak też jej tempa i ram czasowych. Czy system reaguje powoli czy gwałtownie? Jaka jest jego wrażliwość i dynamika odpowiedzi na impulsy zewnętrzne? Czy dąży do stanu równowagi, czy też jego niestabilność się pogłębia? W celu odpowiedzi na wskazane pytania zostanie przedstawiony współczesny stan poszczególnych komponentów systemu, ich ewolucja w ostatnich dekadach oraz prognozy dotyczące dalszego funkcjonowania. Badania systemowe pozwolą również na zdefiniowanie sprzężeń zwrotnych pomiędzy poszczególnymi mechanizmami operującymi wewnątrz systemów lodowcowych oraz pomiędzy tymi procesami i czynnikami zewnętrznymi. Pozwolą one lepiej zrozumieć współczesne zachowanie lodowców.

W poszczególnych rozdziałach analitycznych niniejszego opracowania zawarto odpowiedzi na pytania, stanowiące pośrednie etapy wnioskowania odnośnie funkcjonowania całego kompleksu glacialnego. Pytania te służą do osiągnięcia szczegółowych celów opracowania, którymi są:

- ♦ wskazanie uwarunkowań topograficznych oraz topoklimatycznych depozycji śniegu;
- ♦ określenie roli firnu w funkcjonowaniu lodowca, wpływu zasilania wewnętrznego na kształtowanie bilansu masy oraz oddziaływania cyrkulacji wody i jej przemian fazowych na właściwości termiczne lodowca;
- ♦ zdefiniowanie stanu aktualnego oraz wskazanie kierunków ewolucji struktury hydrotermalnej lodowców;
- ♦ wskazanie wpływu zmian geometrii lodowców od MEL na zmianę sieci drenażu subglacialnego lodowców.

W niniejszej pracy analizowane są procesy glacialne i interakcje z otoczeniem na obszarach zlodowaconych Ziemi Wedela Jarlsberga oraz Ziemi Torella na Spitsbergenie, pomiędzy fiordami van Keulenfjorden (na północy) i Hornsund (na południu). Najszerzej terytorialnie potraktowano analizę reżimu termalnego, która objęła zasięgiem baseny 12 lodowców. Jako cel studiów ewolucji drenażu podlodowcowego wybrano 3 obiekty referencyjne, tj. Lodowiec Hansa, Werenskioldbreen oraz Renardbreen. Obiektem, na którym skupiała się większość badań eksperymentalnych, jest Lodowiec Hansa, będący swoistym terenowym laboratorium naukowym. Nie bez znaczenia pozostaje dostęp do logistycznego zaplecza Polskiej Stacji Polarnej im. Stanisława Siedleckiego, zlokalizowanej w jego pobliżu. Również obserwacje prowadzone w ramach programu naukowego stacji w fiordzie Hornsund stanowiły istotny wkład w kompletność materiału zebranego do tej pracy. Wymienić tutaj należy pozyskane dzięki uprzejmości operatora Polskiej Stacji Polarnej (Instytut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk — IGF PAN) wyniki monitoringu bilansu masy, dane z referencyjnej stacji GNSS (*Global Navigation Satellite System*), dane meteorologiczne. Pracownicy Polskiej Stacji Polarnej istotnie przyczynili się również do technicznego zabezpieczenia terenowych stacji meteorologicznych.

Badania terenowe przeprowadzono w latach 2007—2014. Wyniki modelowania drenażu subglacialnego na podstawie aktualnych oraz archiwalnych danych odniesiono do stanu współczesnego, a także — z końca MEL. Natomiast symulacje potencjalnych zmian struktury hydrotermalnej dotyczące Lodowca Hansa sięgają około dwóch przyszłych stuleci.

W pracy wykorzystano wiele technik terenowych, teledetekcyjnych, kartograficznych, różne metody przetwarzania danych oraz modelowanie matematyczne. Kluczową rolę w pozyskaniu materiałów do analizy odegrała metoda naziemnego sondowania radarowego. Bez tego narzędzia podjęcie opisanej problematyki byłoby niemożliwe. Stąd też technice wykorzystania radiosondowania w badaniach obszarów polarnych oraz przetwarzaniu danych i interpretacji wyników poświęcono odrębny rozdział tego opracowania. Sondowania radarowe pozwoliły na zgromadzenie materiału wykorzystywanego we wszystkich analizach poszczególnych komponentów systemu glacialnego. Dzięki technice radarowej oszacowana została zarówno miąższość, jak i struktura pokrywy śnieżnej na Lodowcu Hansa. Metoda ta pozwoliła na określenie właściwości firnu oraz grubości jego warstwy aktywnej, zawartości wody w lodowcach, ich struktury termalnej, cech drenażu subglacialnego. Georadar posłużył wydzieleniu stref glacialnych, ustaleniu topografii podłoża oraz miąższości lodowców i znalazł wiele innych zastosowań opisanych w dalszej części pracy. Geofizyka radarowa, obecnie tak powszechnie używana w wielu aplikacjach naukowych i inżynierskich, wyrosła z potrzeb poznania mas lodowych na Ziemi i wciąż w tym celu znajduje bardzo szerokie zastosowanie. Dołączenie szerszego opracowania metodyki prac z wykorzystaniem fal radarowych w odrębnym rozdziale ma również aspekt edukacyjny. Dotychczas taka kompilacja informacji i wiedzy praktycznej w odniesieniu do sondowań wykonywanych w obszarach zlodowaconych w polskiej literaturze nie była dostępna.

Dodatkowo dla analizy danych zastosowano symulacje oraz modelowania cyfrowe w zakresie oszacowania rozkładu temperatury w firnie, zmian czasowych struktury termalnej, określenia warunków akumulacji śniegu na podstawie modelu topografii powierzchni, czy też sieci drenażu subglacjalnego, bazując na modelu rzeźby podłoża oraz danych miąższości lodowca. W badaniach posłużono się również analizą radarowego obrazu satelitarnego (SAR — *synthetic aperture radar*) w celu określenia zasięgu linii firnowej na lodowcu oraz wydzielania facji lodowcowych.

Struktura pracy odbiega od klasycznej, przyjętej w rozprawach naukowych. Poszczególne jej części stanowią odrębne, całościowe opracowania prezentowanego zagadnienia, składające się jednak na kompleksowe ujęcie podjętej problematyki. Po części wstępnej zamieszczony został wspomniany wcześniej rozdział metodyczny. Jego rola w niniejszym opracowaniu jest dwójaka. Przede wszystkim dostarcza informacji o uwarunkowaniach związanych z wykorzystaniem głównej metody badawczej, która odnosi się do wyników zaprezentowanych w kolejnych częściach pracy. Jednocześnie stanowi zestawienie wiedzy dotyczącej sondowań radarowych w polarnych obszarach zlodowaconych (i nie tylko), mogące pełnić rolę przewodnika metodycznego. Tego typu opracowania, znane zarówno w literaturze anglojęzycznej (np. NAVARRO i EISEN 2009; ZIRIZZOTTI i in. 2010), jak i rosyjskojęzycznej (np. MACHERET 2006), dotychczas nie były dostępne w języku polskim.

Po części metodycznej następują rozdziały analityczne, w których podjęto próbę rozwiązania szczegółowych problemów funkcjonowania składowych systemu glacialnego. Rozdziały stanowią kompletną i zamkniętą całość zarówno tematyczną, jak i strukturalną. W każdym z nich zdefiniowano problem badawczy, określono szczegółowe cele i zakres merytoryczno-terytorialny, opisano metodykę, przedstawiono i przedyskutowano wyniki, a na końcu podsumowano i wyciągnięto najważniejsze wnioski. W części metodycznej tym razem technika radarowa potraktowana została raczej pobieżnie; na takim poziomie szczegółowości, jaki był niezbędny dla uzupełnienia treści zawartych w rozdziale metodycznym. Niezależność poszczególnych rozdziałów wynika z szerokiego spektrum problemowego, które obejmuje niniejsza praca. Studia poszczególnych stref lodowca, począwszy od powierzchniowej warstwy śniegu aż po przestrzeń pomiędzy jego spągiem a podłożem, wymagały każdorazowo indywidualnego spojrzenia badawczego. Takie podejście ułatwia czytelnikowi zrozumienie poszczególnych etapów procesu poznawczego. Wszystkie elementy niezbędne dla zrozumienia ciągu myślowego autora znajdują się w bezpośredniej bliskości (metody, opis analizowanych obiektów i inne).

Rozdziały analityczne tworzą jednak kompleks pozwalający na wnioskowanie dotyczące funkcjonowania całego systemu glacialnego oraz jego ewolucji warunkowanej zmianami środowiskowymi. Ich synteza znajduje się w ostatnim rozdziale, który integruje wyniki z całej pracy dla uzyskania spójnego obrazu całego systemu glacialnego oraz przeprowadzenia analizy podstawowych kierunków jego ewolucji.

Ponieważ książka prezentuje funkcjonowanie systemów lodowcowych na terenie Svalbardu w pisowni nazewnictwa geograficznego przyjęto zasady rekomendowane przez Komisję Standaryzacji Nazw Geograficznych Poza Granicami Rzeczypospo-



litej Polskiej przy Głównym Geodecie Kraju (KSNG). Dla obiektów geograficznych stosowano egzonimy znajdujące się w opracowanym przez wymienioną komisję Urzędowym Wykazie Polskich Nazw Geograficznych Świata (2013). W przypadku braku odpowiedniego nazewnictwa polskiego użyto nazw oryginalnych (endonimów). Nie stosowano natomiast innych form nazw geograficznych, które pomimo funkcjonowania w polskiej literaturze naukowej lub popularno-naukowej nie znalazły się w przytoczonym wykazie. Jedynym odstępstwem od powyższych zasad jest zastosowanie endonimu Amundsenisen, pomimo rekomendowania przez KSNG polskiej nazwy „Lodowiec Amundsena”. Według autora proponowany egzonim nieprecyzyjnie oddaje charakterystykę tego obiektu geograficznego (wysoko położone lodowe pole akumulacyjne, stanowiące obszar alimentacyjny dla kilku lodowców wpływowych).

Praca skierowana jest do czytelników zainteresowanych procesami zachodzącymi w systemach glacialnych oraz ich reakcją na zmiany środowiskowe. Treść książki powinna również znaleźć odbiorców wśród osób poszukujących wzajemnych interakcji pomiędzy środowiskiem glacialnym a atmosferą, oceanem i litosferą. Geofizycy odnajdą w niej wskazówki metodyczne odnośnie wykorzystania sondowań radarowych w obszarach polarnych. Sądzę również, że zawarte tu informacje zyskają grono czytelników wśród pasjonatów eksploracji Arktyki, w szczególności zlodowaconych obszarów Svalbardu.

Mariusz Grabiec

**The state and contemporary changes  
of the glacial systems in southern Spitsbergen  
in the light of the radar methods**

**S u m m a r y**

The book presents the interactions that take place in the glacial systems and defines the mechanisms that control these processes. The purpose of this book is to investigate how glacial systems react to changing climate.

The conducted analysis applied a set of field studies from 2007—2014 carried out in southern Spitsbergen between van Keulenfjorden fiords in the North and Hornsund in the South. The widely applied radar sounding is an effective research method in the glaciated areas thanks to its noninvasiveness, mobility, wide depth range of the survey area constituting the glacial system, as well as simplicity in distinguishing the structures within the glacier due to their contrastive dielectric properties. The analysis focused on the processes undergoing in particular components of the glacial system (i.e., snow cover, firn, the interior of the glacier in various hydrothermal states, water drainage system) that constitute a complex interacting with the natural surroundings and is thus conducive to the formation of a glaciocystem.

The research shows the glacial systems of Svalbard as responding gradually to the relatively fast environmental changes. Hence the view of the glaciers as indicators of such changes needs to be regarded with caution and due consideration of their delayed response time under a given climate scenario and the potential process that might continue even after the factor that caused the changes has already ceased.

The book is addressed to all the individuals who study glacial processes and the reaction of glacial complexes in the Arctic to the environmental changes, and to experts who use geophysical surveys, predominantly radar systems in the glaciated areas. It will also be of interest to aficionados of Earth's frigid zones.

Mariusz Grabiec

## **Der Zustand und die Veränderungen von Gletschersystemen des Süd-Spitzbergens im Lichte der Forschungen mittels Radarsondierungen**

### **Zusammenfassung**

Die vorliegende Abhandlung zeichnet die zwischen den in Gletschersystemen erfolgenden Veränderungen nach und definiert die diese Prozesse steuernden Mechanismen. Sie soll ausführen, auf welche Art und Weise glaziale Gletschersysteme auf fluktuierende Umweltverhältnisse reagieren.

Bei der Analyse bediente man sich der in den Jahren 2007—2014 im Süd-Spitzbergen zwischen den Fjorden Keulenfjorden im Norden und Hornsund im Süden durchgeführten Feldforschungen. Die weitverbreiteten Radarsondierungen sind eine effektive Forschungsmethode in vereisten Gebieten, denn sie sind sanft und mobil, zeichnen sich durch große Tiefenmessungsreichweite in den das glaziale System bildenden Stoffen und durch leichte Unterscheidung von inneren Gletscherstrukturen wegen deren dielektrischen Kontrasteigenschaften aus. Untersucht wurden Prozesse, die verlaufen in den einzelnen Komponenten des Gletschersystems (Schneedecke, Firn, Gletscherinnere in verschiedenem hydrothermale Zustand, Wasserdrainage), welche ein in Folge der Interaktion mit der Umwelt entstehendes Komplex — das Glazialsystem, bilden.

Aus den Forschungen geht hervor, dass glaziale Systeme von Svalbard auf verhältnismäßig rapide Umweltveränderungen evolutionistisch reagieren. Die Bezeichnung für die Gletscher als Indikatoren für Umweltveränderungen mag daher nur vorsichtig angewandt werden. Man muss zwar in Betracht ziehen, dass die Reaktion der Gletscher dem wirkenden Impuls gegenüber verspätet ist, und die Fortsetzung des Prozesses auch nach dem Rücktritt des die Veränderungen auslösenden Faktors möglich ist.

Zu empfehlen ist der Band sowohl denjenigen, die glaziale Prozesse und die Reaktion der glazialen Komplexe des Arktis auf Umweltveränderungen studieren, und den geophysische Methoden (besonders Radarsondierung) in vereisten Gebieten benutzenden Spezialisten, als auch den für Polargebiete große Interesse habenden Personen.

Redaktor  
Magdalena Kopeć

Projektant okładki, układu typograficznego oraz łamanie  
Paulina Dubiel

Korektor  
Jadwiga Gaździcka

Copyright © 2017 by  
Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego  
Wszelkie prawa zastrzeżone

**ISSN 0208-6336**

**ISBN 978-83-226-3014-3**

(wersja drukowana)

**ISBN 978-83-226-3015-0**

(wersja elektroniczna)

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. Liczba arkuszy drukarskich: 41,0. Liczba arkuszy wydawniczych 24,5. Cena 58 zł (+VAT).  
Publikację wydrukowano na papierze Alto 100 g/m<sup>2</sup>, vol. 1.5. Do składu użyto krojów pisma Karmina  
oraz Karmina Sans (autorstwa Veroniki Burian & José Scaglione / TypeTogether).  
Druk i oprawę wykonano w drukarni: „TOTEM.COM.PL Sp. z o.o.”, Sp.K. (ul. Jacewska 89, 88-100 Inowrocław).