

# Badania ruchu lodowca Hansa na Spitsbergenie

Janusz Walo, Artur Adamek, Andrzej Pachuta,  
Kinga Wężka, Zbigniew Malinowski, Marcin Rajner

Politechnika Warszawska, Wydział Geodezji i Kartografii

## Streszczenie

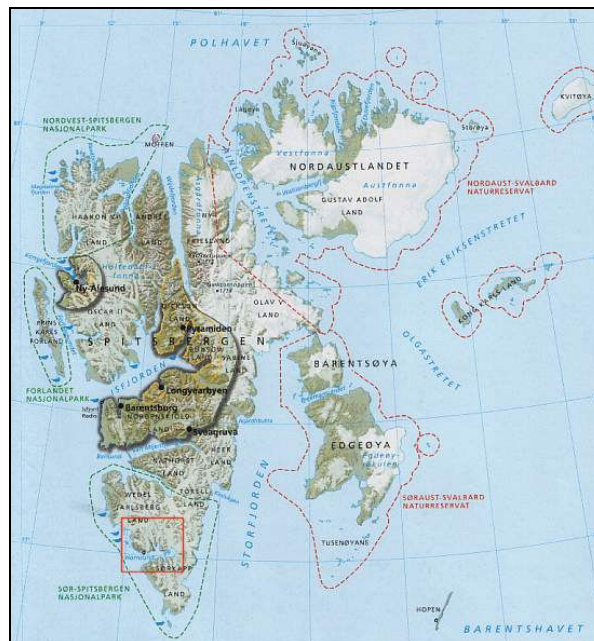
Określenie powierzchniowej prędkości lodowca to ważna informacja dla badań glaciologicznych. Powierzchniowy ruch lodowca Hansa wyznaczany jest od kilku lat głównie za pomocą tachimetru elektronicznego. Wykorzystanie w ostatnich dwóch latach w obserwacji satelitarnych GPS pozwoliło rozszerzyć zasięg monitorowania lodowca i znacznie przyspieszyć prace pomiarowe. W referacie omówione zostały pomiary pozycji tyczek profili podłużnego i poprzecznego wykonane latem tego roku. Prezentowane są też wstępne wyniki dotyczące ruchu powierzchniowego dla wybranej tyczki ablacyjnej.

## Abstract

Surface speed of the glacier is an important information for glaciological studies. Surface speed of the Hans-glacier has been determined sine last several years mainly applying total-station instruments. GPS satellite measurements during last few years makes possible to extend the glacier monitoring and considerably hasten the measuring process. The paper presents the observations of the positions of ablative poles of oblong and crosswise profiles done last summer. Preliminary results concerning the surface motion of an ablative pole have been also presented.

## 1. Wstęp

Archipelag Svalbard (Zimny Ląd), z największą wyspą Spitsbergenu, położoną pomiędzy 80°48' a 76°28' szerokości geograficznej północnej, oraz pomiędzy 10°28' a 28°50' długości geograficznej wschodniej. Należy on do lądów najbardziej wysuniętych na północ.



Rys 1. Mapa Spitsbergenu.

Spitsbergen charakteryzuje się wyjątkowo dużą zmiennością warunków atmosferycznych. Wpływają one istotnie na wyniki pomiarów, w których należy dostosować techniki pomiarowe do występujących tam warunków. Decyzje w tym zakresie wspomaga wiedza o naturalnym środowisku polarnym oraz doświadczenie zdobyte podczas realizacji badań. Warunki klimatyczne sprzyjają tworzeniu się znacznej kumulacji lodu w postaci lodowców spływających z terenów górzystych, często bezpośrednio do fiordów. Podstawowym zadaniem czwartej ekspedycji polarnej na Spitsbergen organizowanej przez Wydział Geodezji i Kartografii było kontynuowanie prac geodezyjnych zmierzających do określenia charakteru ruchu lodowca Hansa położonego w pobliżu stacji Hornsund Instytutu Geofizyki Polskiej Akademii Nauk. Opiekunem wyprawy był dr Janusz Walo, a kierownikiem ekipy studenckiej Kinga Wężka

## **2. Ogólna charakterystyka lodowców**

Określenie powierzchniowej prędkości lodowca to ważna informacja dla badań glaciologicznych. Prędkość ruchu lodu jest różna dla każdego z lodowców. Ruch jest także zróżnicowany w obrębie pojedynczego lodowca i ulega zmianom w czasie (dobowym, sezonowym, wieloletnim). A przestrzenne i czasowe zróżnicowanie prędkości ruchu wynika z różnych czynników. Najważniejsze z nich to: ilość i właściwości lodu (temperatura, obecność płynnej wody), topografia oraz inne cechy podłoża.

Ruch jest również jednym z czynników decydujących o dynamice procesów glacialnych i geomorfologicznych, jak również o ich wyrazie w geometrii lodowca. Mechanizm ruchu lodowców był przedmiotem wielu dociekań teoretycznych i badań eksperymentalnych, a także ożywionych kontrowersji w ostatnich latach. (Jania, 1997)

Lodowce nie powstają w każdej części kuli ziemskiej. Muszą zostać spełnione pewne określone warunki. Warunki takie panują w wysokich górach, powyżej granicy wiecznego śniegu, gdzie ilość dostarczanego „materiału” (opady) jest większa i następuje szybciej niż jego topnienie. Ponadto opady śniegu muszą być regularne i występować często, a opadający śnieg musi znaleźć się na dosyć rozległym i płaskim terenie. Teren taki nazywamy polem firnowym.

Granica wiecznego śniegu jest różna na różnych szerokościach geograficznych. Na równiku znajduje się na wysokości około 5000 metrów, wzrasta do około 6000 metrów w okolicach zwrotników, a następnie systematycznie maleje aż do zera na biegunach. Kiedy powyższe warunki zostaną spełnione, śnieg pod wpływem nacisku wyżej położonych warstw przekształca się w firn (przekryształizowany śnieg), a następnie w lód lodowcowy. Lód taki w odróżnieniu od zwykłego lodu jest plastyczny i wciska się w każdą szczelinę jaką napotka na swojej drodze. Właśnie dlatego lodowce nie są nieruchomymi tworem, ale poruszają się z różną prędkością. Traktuje się je jako system, czyli układ elementów wewnątrznie skoordynowanych o określonej strukturze. Lodowce stanowią dynamiczny system otwarty, gdyż istotną ich cechą stanowi obieg masy (lodu, śniegu, wody i materiału morenowego) i wymiana energii, realizujące się przez akumulację, płynięcie lodu oraz ablację. Procesy te podlegają wpływom czynników zewnętrznych i jednocześnie aktywnie oddziałują na środowisko. Oprócz tego warunki klimatyczne decydują o możliwościach powstawania lodowców. Poza tymi czynnikami jest jeszcze wiele innych, które decydują o miejscu i czasie powstania

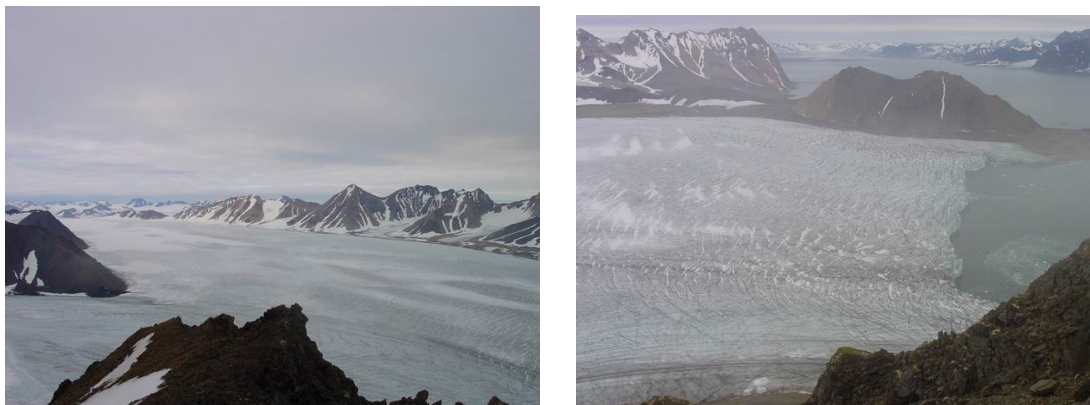
lodowca. Można je podzielić na nadrzędne i podrzędne a te z kolei, na globalne i lokalne. Coroczna akumulacja mas śnieżnych jest warunkiem istnienia lodowca.

Lodowce można podzielić ze względu na kształt, wielkość, rozmiar, temperaturę lodu, typ morfologiczny, topografię, a co się z tym wiąże układ kierunków ruchu lodu. Ze względu na charakter pracy wyróżniamy trzy grupy lodowców (Jania, 1997):

- 1) lodowce w postaci ciągłych pokryw z lodem spływającym radialnie we wszystkich kierunkach;
- 2) lodowce w postaci zaznaczających się strug lodowych z możliwością wskazania ich głównego kierunku przemieszczania;
- 3) lodowce rozpościerające się w postaci większych lub mniejszych pokryw na przedpolu zlodowaconych gór.

### 3. Lodowiec Hansa w fiordzie Hornsund

Z dwunastu lodowców znajdujących się w rejonie fiordu Hornsund lodowiec Hansa (Rys. 2) jest pierwszym od strony zachodniej północnego brzegu fiordu. Lodowiec Hansa jest lodowcem dolinnym, politermalnym uchodzącym do fiordu Hornsund w Południowym Spitsbergu, w pobliżu Polskiej Stacji Polarnej PAN. Początek swój bierze na wysokości 515 m n.p.m. na siodle na wschód od przełęczy Strypet oraz góry Einstödingen. Siodło to oddziela (jest lododziałem) lodowiec Hansa od lodowca Torella. Od strony wschodniej znajduje się równina lodowca Kvitungisen, na obszarze której można wyróżnić siodło wznoszące się niewiele ponad 400 m n.p.m., tworzące lododział pomiędzy lodowcami Hansa i Paierla. Początek lodowca Hansa nie posiada tak charakterystycznej misy cyrkowej jak inne lodowce. Od strony wschodniej graniczy z masywem górskim Sofiekammen ze szczytami Wintertinden (925 m n.p.m.) i Fannytoppen (412 m n.p.m.). Od zachodu ograniczają go góry, wśród nich Stryptegga z wierzchołkiem 734 m i Bergnova z wierzchołkiem 655 m. Również od strony zachodniej wpływają do lodowca Hansa dwa małe lodowce Deillegg i Tuv ograniczone od zachodu wzgórzami Deillegga i Skalfiellet. W sąsiedztwie znajdują się góry Fugleberget o wysokości 569 m od strony zachodniej i od strony wschodniej Fannytoppen o wysokości 412 m.



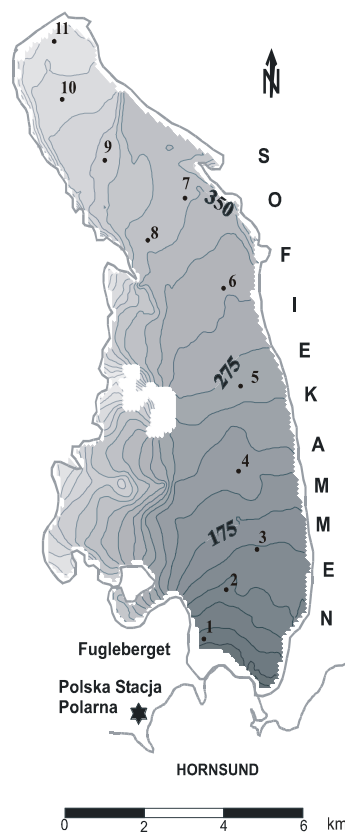
**Rys 2** Widok na lodowiec Hansa (fot. Z.Malinowski)

Lodowiec Hansa ma około 16 kilometrów długości i zajmuje powierzchnię 57 km<sup>2</sup>. „Jęzor” lodowca ma 2,5 kilometra szerokości i kończy się ciętym się czołem szerokości półtora kilometra. Boczne partie lodowca oparte są o brzozy doliny, a jego główny nurt spoczywa na dnie fiordu. Jest on średniej wielkości lodowcem Spitsbergenu.

Światowa Służba Monitoringu Lodowców (WGMS - World Glacier Monitoring Service) włączyła lodowiec Hansa do bazy danych obejmującej 60 wybranych lodowców. Lodowiec ten jest jednym z lepiej zbadanych i monitorowanych lodowców Arktyki.

#### 4. Dynamika lodowców

Tradycyjną metodą badania ruchu lodowca jest wyznaczanie zmian położenia charakterystycznych punktów lodowca, na których założone specjalne drewniane tyczki zwane tyczkami ablacyjnymi (Rys. 3). Tyczki te rozmieszczone są równomiernie wzdłuż całego lodowca. Osadzone są głęboko w jego powierzchni, tak by mogły przetrwać co najmniej kilka sezonów. Ponieważ większa część lodowca należy do strefy ablacyjnej, tyczki z każdym rokiem wytapiają się. Wówczas zachodzi konieczność ich ponownego zatopienia w lodzie.



**Rys. 2.** Rozmieszczenie tyczek ablacyjnych wzdłuż lodowca Hansa

Pozycja tyczek ablacyjnych wyznaczana była do niedawna klasycznymi metodami geodezyjnymi lub - sporadycznie - satelitarnymi metodami nawigacyjnymi. Na powierzchni lodowca Hansa usytuowanych jest 11 tyczek (rys. 2), z czego tylko pierwszych 5 znajduje się w za-

sięgu pomiaru tachimetrem. Pomiary tachimetryczne wykonywane są z bazy założonej na zboczu góry Fugleberget instrumentem Leica TCR 1100. Pozycja pozostałych tyczek wyznaczana była odbiornikiem nawigacyjnym GPS – GARMIN 12 z błędem średnim szacowanym na  $\pm 10$  metrów. Częstotliwość wyznaczeń pozycji tyczek metodą klasyczną w głównej mierze zależy od warunków atmosferycznych i pory roku. Wiele przerw w pomiarach przypada na okres nocy polarnej, poza tym pomiary wykonywane są dość regularnie (średnio 1-2 razy w miesiącu).



**Rys. 3.** Pomiar pozycji tyczek ablacyjnych na lodowcu Hansa (fot. A.Adamek)

W trakcie poprzednich wypraw przeanalizowano różne techniki wyznaczania zmian zasięgu lodowców w oparciu o pomiary terenowe, mapy topograficzne i zdjęcia fotogrametryczne. W 2004 roku podczas 3 wyprawy Wydziału Geodezji i Kartografii PW na Spitsbergen zaproponowano zmianę dotychczasowej techniki pomiaru na technikę satelitarną GPS. Pomiar pozycji tyczek ablacyjnych wykonano ustawiając antenę GPS ekscentrycznie w odległości 15-25 cm w kierunku południowym lub północnym od podstawy tyczki. Na każdym z punktów pomiarowych znajdujących się na lodowcu wykonano około 5 minutowe obserwacje. Pozycje tyczek ablacyjnych zostały wyznaczone w układzie WGS'84. Do wyznaczenia pozycji tyczek ablacyjnych na lodowcu został wykorzystane instrumenty firmy Leica: SR 530 i System 1200. Z analizy dokładności obserwacji na stanowisku wynika, że błędy średnie położenia wyznaczone dla większości tyczek nie przekroczyły  $\pm 5$  cm.

Obok ruchu postępującego lodowca obserwuje się też niewielkie oscylacje poprzeczne, które jak się sądzi wynikają z konfiguracji podłoża. Jeżeli przeważa ruch deformacyjny, utrzymuje się stały kierunek ruchu. Natomiast w przypadku zwiększonego ślizgu dennego następują przemieszczenia zgodnie z nierównościami podłoża i mogą one wywołać efekt zmiany kierunków na powierzchni. Inna przyczyna może leżeć w różnicy tarcia pomiędzy centralną częścią lodowca, który uchodzi do fiordu, a częściami bocznymi, które spoczywają na lądzie.

Poza tyczkami ablacyjnymi (profil podłużny) w ramach ostatniej wyprawy założono na wysokości 4 tyczki ablacyjnej profil poprzeczny składający się z 20 znaków rozmieszczonych co około 125 m. Pozycję znaków zmierzono trzykrotnie w sierpniu oraz planuje się ich powtórny pomiar we wrześniu. Wyniki będą dostępne pod koniec października. Poniżej podane zostały zmiany pozycji wybranych znaków profilu poprzecznego obliczone pomiędzy dwoma pomiarami (10 i 15 sierpnia 2005):

**Tabela 1. Zmiany pozycji znaków profilu poprzecznego [m]**

<b>Punkt</b>	<b>dx</b>	<b>dy</b>	<b>dH</b>
<b>P01</b>	-0,085	0,122	-0,204
<b>P06</b>	-0,218	0,069	-0,225
<b>P10</b>	-0,470	0,025	-0,083
<b>P15</b>	-0,642	0,030	-0,166
<b>P20</b>	-0,417	0,047	-0,263

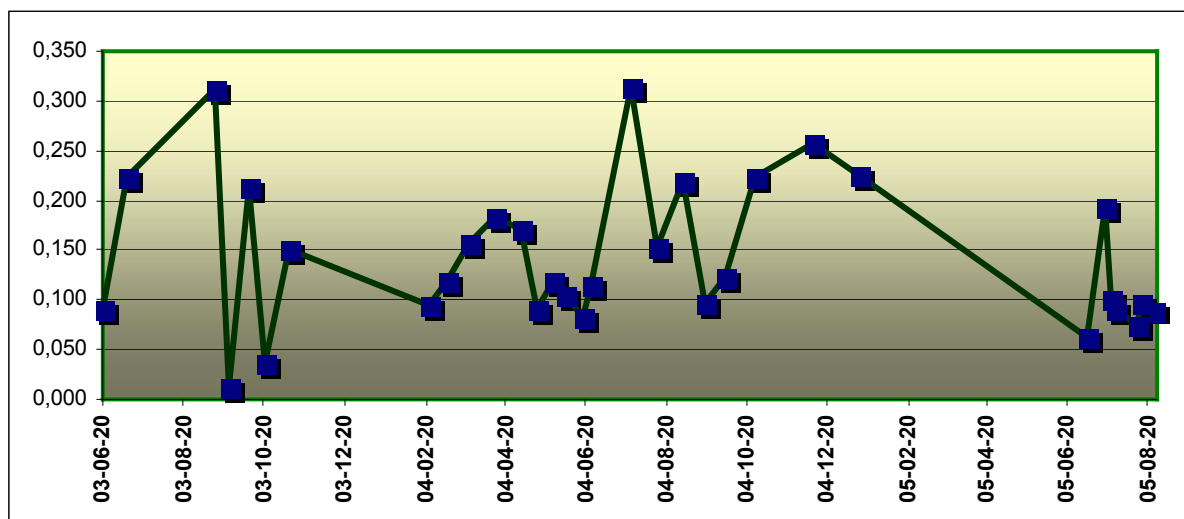
#### **4. Sezonowe zmiany ruchu lodowca**

Różnice w szybkości ruchu lodowca w różnych porach roku są znane od dosyć dawna i najczęściej łączy się je ze zmianami w ślizgu dennym. Interesującym wynikiem pomiarów prędkości lodowca Hansa jest stwierdzenie różnic w kierunkach wektorów w różnych okresach pomiarowych. Analiza materiałów pomiarowych wskazuje, że w ciągu roku istnieje okres znacznie większych powierzchniowych prędkości lodowca. Przeważają poglądy, że zmiany prędkości lodowców są następstwem zmian ilości wody w podłożu lodowca – najprawdopodobniej wody roztopowej z powierzchni. Ma to związek z ciśnieniem subglacjalnym; im ciśnienie jest większe tym ruch lodowca intensywniejszy.

Poniżej przedstawiono przykład zmian powierzchniowej prędkości lodowca z różnymi sezonami w roku. Analizy można było dokonać dzięki kilkuletnim pomiarom tyczek ablacyjnych prowadzonym na lodowcu Hansa. Do prezentacji została wybrana tyczka nr 4 usytuowana mniej więcej w środkowej części lodowca w jego profilu podłużnym, czyli w głównym i jednym z najaktywniejszych „nurtów” lodowca Hansa. Pozycja tyczki do zeszłego roku mierzona była tachimetrem elektronicznym, a od tego roku za pomocą GPS. Łatwo zauważyć, że prędkość ruchu lodowca jest związana z porą roku, a jej średnia wartość to około 14 cm na dobę, przy czym w niektórych okresach dochodzi nawet do 30 cm na dobę.

Istota pomiarów przemieszczeń jest nierozłączna z upływem czasu, wyznaczone zaś wielkości przemieszczeń - z odpowiednimi jego okresami. Wielkości te, przedstawione są z reguły w funkcji czasu. Ilustruje się je również jako zarejestrowane wielkości innych czynników, które mogą wywierać wpływ na zachowanie się badanego obiektu. W tym przypadku należą do nich m.in.: temperatura, opady deszczu, opady śniegu. Analizie poddano przemieszczenia pierwszych pięciu tyczek ablacyjnych ze względu na dokładność oraz systematyczność uzyskiwanych wyników. Pozycje tyczek (6-11) położonych w górnej partii lodowca Hansa, wyznaczane są rzadziej i analiza ich ruchu będzie możliwa po zebraniu całego materiału obserwacyjnego (pod koniec października tego roku).





Rys. 8. Sezonowe zmiany ruchu lodowca Hansa (źródło: Puczek, 2004 i pomiary własne)

## 5. Podsumowanie

Wykorzystanie pomiarów satelitarnych GPS w badaniu ruchu powierzchniowego lodowców daje znaczne korzyści, przede wszystkim pozwala na szybki i dokładny pomiar pozycji tyczek ablacyjnych w każdej części lodowca niezależnie od pogody, czy pory roku. Istotne jest też to, że w oparciu o obserwacje satelitarne możliwe jest wyznaczenie ablacji lodowca w zamarkowanych miejscach. Zebrane doświadczenia pozwalają także wyciągnąć inne wnioski dotyczące pomiarów i ich organizacji:

- w pomiarach najkorzystniej wykorzystać technologię szybką statyczną w przypadku profilu podłużnego i RTK dla profilu poprzecznego;
- w celu ograniczenia wielodrożności sygnału GPS pomiary należy wykonywać ekscentrycznie w odległości przynajmniej 0.5 m od tyczki, a antena GPS powinna być ustawiona przynajmniej na wysokości 1 m,
- dla uzyskania wiarygodnych wyników pomiary powinny być wykonywane raz w miesiącu, a latem (maj-wrzesień) co najmniej dwa razy na miesiąc;
- z uwagi na bezpieczeństwo obserwatorów zespół pomiarowy powinien składać się z co najmniej z dwóch osób i być odpowiednio wyposażony (raki, liny, radiotelefony itp.).

## Literatura

- Adamek A., *Geodezja ekstremalna*, Magazyn Geoinformacyjny „Geodeta”, nr 12/2004;
- Adamek A., *Badanie dynamiki lodowców i struktur geologicznych na Spitsbergenie geodezyjnymi metodami klasycznymi i satelitarnymi*. Praca dyplomowa-magisterska, Warszawa, 2005
- Jania J., *Glaciologia*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997;
- Kurczyński Z., *Studenci przemierzają Arktykę*, Magazyn Geoinformacyjny „Geodeta” nr 10/2003;
- Pachuta A., *Pierwsza wyprawa Wydz. GiK PW na Spitsbergen*, Przegląd Geodezyjny 1989, No 4-5 (18-21), Warszawa 1989;
- Pałubski A., *Wyrównanie i analiza sieci punktów dla otoczenia fiordu Hornsund*, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 2003;
- Sagan M., *Opracowanie zasięgu czoła lodowca Hansa na podstawie zdjęć wieloczasowych*, Praca dyplomowa-magisterska, Warszawa, 2005.