

# **PORÓWNANIE SATELITARNYCH METOD STATYCZNYCH I KINEMATYCZNYCH W BADANIACH RUCHU LADOWCA HANSA NA SPITSBERGENIE**

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

## **1. Wstęp**

Historia polskich pomiarów geodezyjnych na Spitsbergenie sięga 1932 roku. Kolejne ekspedycje poszerzały nie tylko zakres badań, ale również objęły swoim pomiarem co raz to nowe obszary Spitsbergenu realizując prace w trudnych, arktycznych warunkach. Prowadzone od 1978 roku prace badawcze skupiły się w rejonie fiordu Hornsund w okolicy Polskiej Stacji Polarnej PAN. Stacja stała się centrum naukowym i bazą wypadową również dla specjalistów w dziedzinie geodezji. Głównym celem pracy jest przedstawienie możliwości zastosowania nowoczesnej technologii pomiarów satelitarnych GPS dla potrzeb monitorowania lodowców. Przeprowadzono praktyczną weryfikację proponowanych technik pomiarowych.

Określenie parametrów ruchu lodowca było możliwe dzięki analizie danych uzyskanych z Zakładu Badań Polarnych i Morskich Instytutu Geofizyki Polskiej Akademii Nauk oraz wykonaniu pomiarów na lodowcu Hansa w 2005 roku przez studentów i pracowników Politechniki Warszawskiej w ramach XXVII Wyprawy Centralnej Instytutu Geofizyki PAN. Uzyskane wyniki pozwoliły m.in. na określenie przemieszczeń oraz przeprowadzenie szczegółowej analizy zaistniałych zjawisk związanych z dynamiką lodowca Hansa.

## **2. Podstawowe informacje o Spitsbergenie**

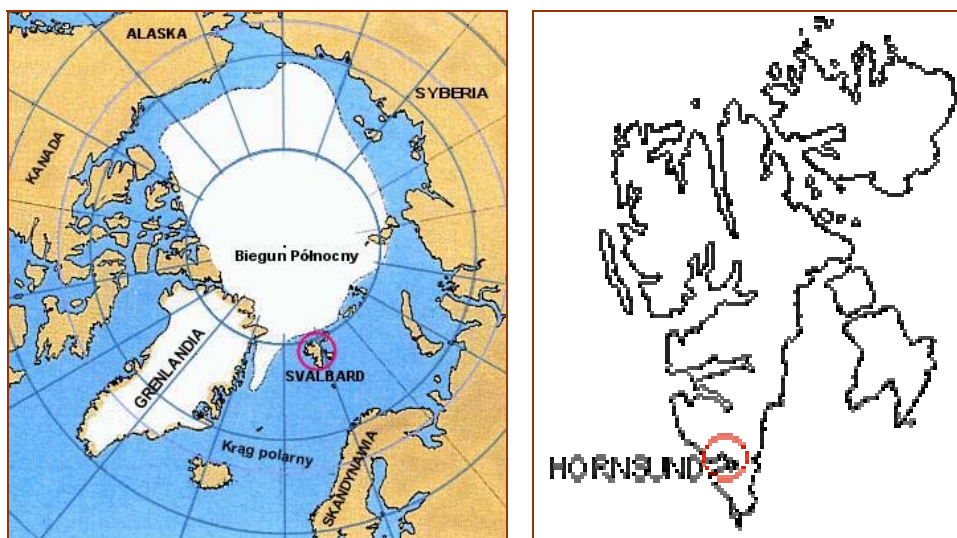
Svalbard (w języku norweskim Zimny Łąd) obejmuje archipelag składający się z 5 wysp większych i szeregu mniejszych, położonych między 76°28' a 80°48' szer. geogr. płn., oraz między 10°28' a 28°50' dług. geogr. wsch. Spitsbergen jest największą wyspą tego archipelagu i należy do najbardziej wysuniętych na północ lądów.

Powierzchnia całego archipelagu wynosi około 63 tys. km<sup>2</sup> z czego na Spitsbergen (do 1969. – Spitsbergen Zachodni) przypada około 38 tys. km<sup>2</sup>. Pozostałe wyspy archipelagu to: Nordaustlandet (Ziemia Północno-Wschodnia), Barentsoya (W. Barentsa), Edgeoya (W.Edge'a), Prins Karls Forland (Ziemia Księcia Karola) oraz kilka mniejszych: KvitØya (Biała Wyspa), Kong Karls Land (Ziemia Króla Karola), Land BjørnØya (Wyspa Niedźwiedzia).

Na mocy Traktatu Spitsbergeńskiego (1920r.) zwierzchnictwo nad obszarem Spitsbergenu sprawuje Norwegia, z zapewnieniem równości praw wszystkich sygnatariuszy w zakresie działalności gospodarczej i naukowej. Traktat podpisany został 9 lutego 1920 roku w Wersalu przez przedstawicieli 12 państw. Polska podpisała traktat w 1921 roku.

Spitsbergen posiada wybrzeże bogato rozczłonkowane o licznych zatokach i głęboko wcinających się w ląd fiordach, szczególnie od strony zachodniej i północnej. Pod względem ukształtowania pionowego, Spitsbergen ma charakter zdecydowanie górzysty. Większość obszaru pokrywają spływające lodowce, pomiędzy którymi wystają pasma górskie oraz pojedynczo sterczące skaliste szczyty (nunataki), dochodzące do wysokości ponad 1000 m. Ogółem powierzchnia Spitsbergenu jest w 90% stale zlodowaciała. Najwyższy szczyt położony w rejonie północnym to Newtontoppen (1713m), a w południowym koło Hornsundu to Horsundtind (1432m).

Polarny klimat archipelagu Spitsbergen jest pod dużym wpływem różnych prądów morskich. Dominujący wpływ ma bardzo zimny prąd morski płynący od Morza Barentsa. W efekcie, właśnie wschodnia część Spitsbergenu ma najniższą średnią temperaturę roczną, a szeroka strefa paku lodowego często uniemożliwia dostęp do wschodnich brzegów nawet w okresie letnim. Przeciwnie jest zachodnia część Svalbardu, ogrzewana przez ciepły Prąd Zatokowy (Golfsztrom) i dostępna dla statków przez całe arktyczne lato. Skutkiem tego zachodnie wybrzeże posiada, zwłaszcza w okresie letnich miesięcy, łagodniejszy klimat niż wewnątrz archipelagu.



Rys. 1. Archipelag Svalbard (<http://hornsund.igf.edu.pl/mapa1.html>)

### 3. Wyprawy Wydziału Geodezji i Kartografii na Spitsbergen

Pierwsza naukowa wyprawa Wydziału Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej wyruszyła z Warszawy na Spitsbergen 24 maja 1988 roku. Inicjatorami wyprawy byli geodeci - pracownicy wydziału: prof. Jerzy Fellmann, prof. Janusz Śledziński, prof. Zbigniew Ząbek i dr inż. Andrzej Pachuta.

W wyprawie Wydziału Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej wzięło udział 6 osób. Kierownikiem wyprawy był dr inż. Andrzej Pachuta, opiekunem naukowym dr inż. Ryszard Preuss. Ponadto uczestniczyło 4 studentów: Jarosław Kutyna, Artur Gustowski, Dariusz Osuch i Piotr Wypych. Program naukowy wyprawy zakładał:

- ✓ założenie sieci geodynamicznej wokół Hordu Homsund,
- ✓ wykonanie pierwszej serii pomiarów liniowo-kątowych w sieci,
- ✓ dowiązanie sieci geodynamicznej do norweskiej osnowy Spitsbergenu,
- ✓ założenie niwelacyjnych linii pomiarowych do badania względnych pionowych ruchów skorupy ziemskiej,
- ✓ wykonanie pomiarów geodezyjnych i tachimetrycznych w celu opracowania mapy okolic stacji PAN w skali 1:500.

Kolejna wyprawa, w której udział wzięli pracownicy i studenci Wydziału Geodezji i Kartografii PW odbyła się w połowie sierpnia 2003 roku. Wyprawa została zorganizowana przez studentów z Ogólnopolskiego Klubu Studentów Geodezji przy Stowarzyszeniu Geodetów Polskich. W ekspedycji uczestniczyli: dr inż. Zdzisław Kurczyński - opiekun naukowy, Małgorzata Piskorz, Michał Sagan i Artur Adamek - studenci IV i V roku PW. Pozostali członkowie to studenci Akademii Górniczo - Hutniczej w Krakowie (Marta Boroń, Andrzej Pałubski, Leszek Szymala) i Akademii Rolniczej z Wrocławia (Ewa Wielgosz, Mariusz Adamczak, Marcin Cysewski) oraz przedstawiciele sponsora głównego – mgr inż. Adam Domagała i mgr inż. Szymon Wajda (KURCZYŃSKI 2003, PAŁUBSKI 2004). Ogólnie w wyprawie wzięło udział 12 osób.

Uczestnicy postawili sobie kilka celów naukowych. Najważniejsze to: powtórny pomiar poligonu geodynamicznego założonego w 1988 roku przez dr inż. Andrzeja Pachutę na obszarze wokół fiordu Hornsund oraz fotogrametryczna rejestracja zasięgu czoła lodowca Hansa i porównanie go ze stanami wcześniejszymi.

Latem 2004 roku wyruszyła XXVII Wyprawa Centralna PAN do Hornsundu na Spitsbergenie. Razem z nią letnie grupy, m.in. geodeci z Wydziału Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej: dr inż. Marek Woźniak i Artur Adamek. Plan prac geodezyjnych obejmował między innymi:

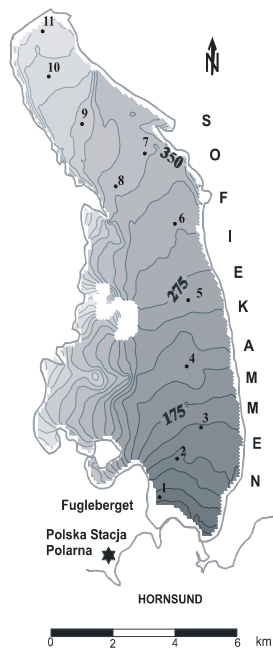
- ✓ badanie pionowych przemieszczeń stóp fundamentowych pod zbiornikami na paliwo ciekłe w Polskiej Stacji Polarnej,
- ✓ pomiar położenia tyczek ablacyjnych na lodowcu Hans przy użyciu techniki GPS.

W sierpniu 2005 roku zorganizowana została kolejna czwarta już wyprawa na Spitsbergen, pod kierownictwem dr inż. Janusza Walo. Uczestnikami wyprawy byli studenci: Kinga Węzka, Zbigniew Malinowski i Marcin Rajner. Najważniejsze prace geodezyjne wykonane w trakcie wyprawy objęły:

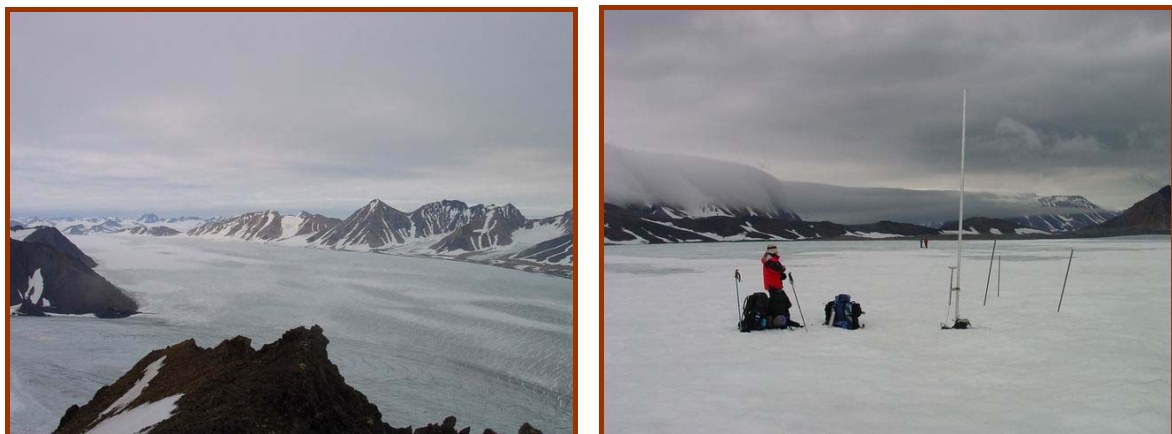
- ✓ testowe uruchomienie stacji referencyjnej GPS,
- ✓ powtórzenie pomiarów na poligonie geodynamicznym,
- ✓ wykonanie serii obserwacji satelitarnych GPS dla śledzenia ruchu powierzchniowego lodowca Hansa,
- ✓ wykonanie pomiarów niwelacyjnych dla kontroli osiadania stóp fundamentowych zbiorników paliwowych stacji.

#### 4. Badanie powierzchniowego ruchu lodowca Hansa wzdłuż profilu podłużnego

Najważniejszym materiałem wyjściowym do wykonania badań były dane pozyskane z Zakładu Badań Polarnych i Morskich Instytutu Geofizyki PAN. Od wielu lat prowadzone są wszechstronne badania lodowca Hansa (JANIA 1997). W celu śledzenia ruchu lodowca i jego ablacji osadzone zostały w 2000 roku tyczki ablacyjne. Osadzono łącznie 15 tyczek ablacyjnych z czego 11 rozmieszczonych wzdłuż lodowca tworzy profil podłużny do badania różnic prędkości w zależności od odległości od czoła lodowca. Dodatkowo osadzonych zostało 5 tyczek na dopływach lodowca Hansa.



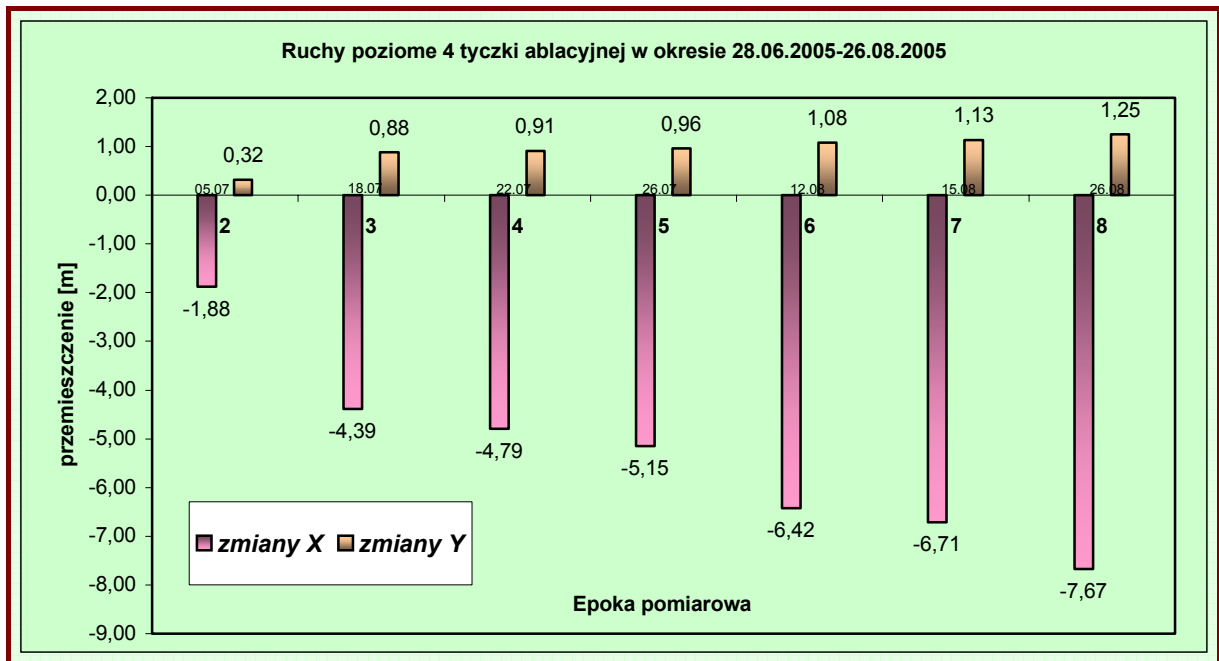
*Rys. 2 Szkic rozmieszczenia tyczek ablacyjnych na lodowcu*



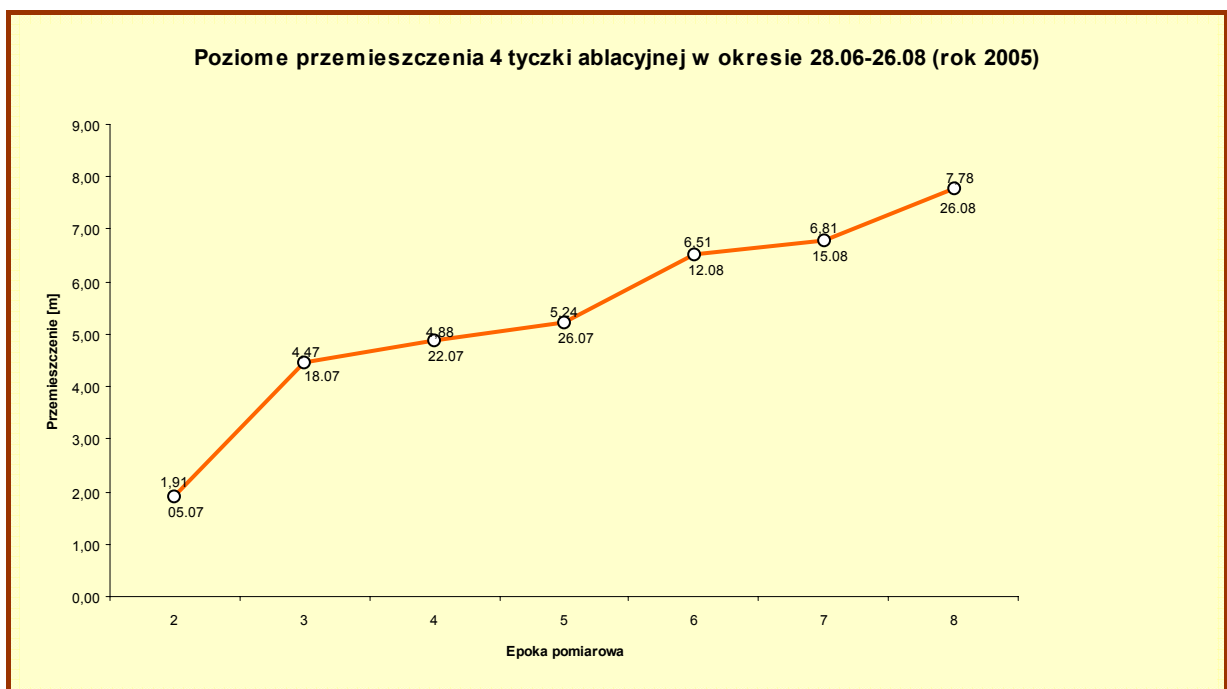
*Rys 3 Widok na lodowiec Hansa (fot. Z.Malinowski) i pomiar pozycji tyczek ablacyjnych na lodowcu Hansa (fot. A.Adamek)*

W 2004 roku zaproponowano zmianę dotychczasowej techniki pomiaru, wykorzystując geodezyjne odbiorniki GPS. Jak dotąd nikt wcześniej nie wykonał podobnych obserwacji wszystkich tyczek z dokładnością większą niż  $\pm 1$  m. W ramach prac wykonanych w 2005 roku zostało w sumie siedem pomiarów w technologii szybkiej statycznej (po około 10 min

obserwacji na każdym punkcie). W zależności od warunków atmosferycznych i możliwości technicznych za każdym razem pomierzono różną liczbę tyczek ablacyjnych. We wszystkich epokach udało się zmierzyć jedynie pozycję 4-tej tyczki oddalonej około 4 km od czoła łodowca. Wyniki z wyznaczeń przemieszczeń zawiera tabela 1. W tabeli w kolejnych kolumnach zapisane są: ablacja wyznaczona z pomiaru bezpośredniego przy tyczce, zmiany współrzędnych x i y oraz zmiany wysokości w kolejnych epokach obserwacyjnych. Na wykresach (rys. 4 i 5) przedstawiono graficznie przemieszczenia czwartej tyczki ablacyjnej w okresie od 28 czerwca do 26 sierpnia 2005 roku.



Rys.4. Zmiany współrzędnych 4 tyczki ablacyjnej w kolejnych epokach obserwacyjnych



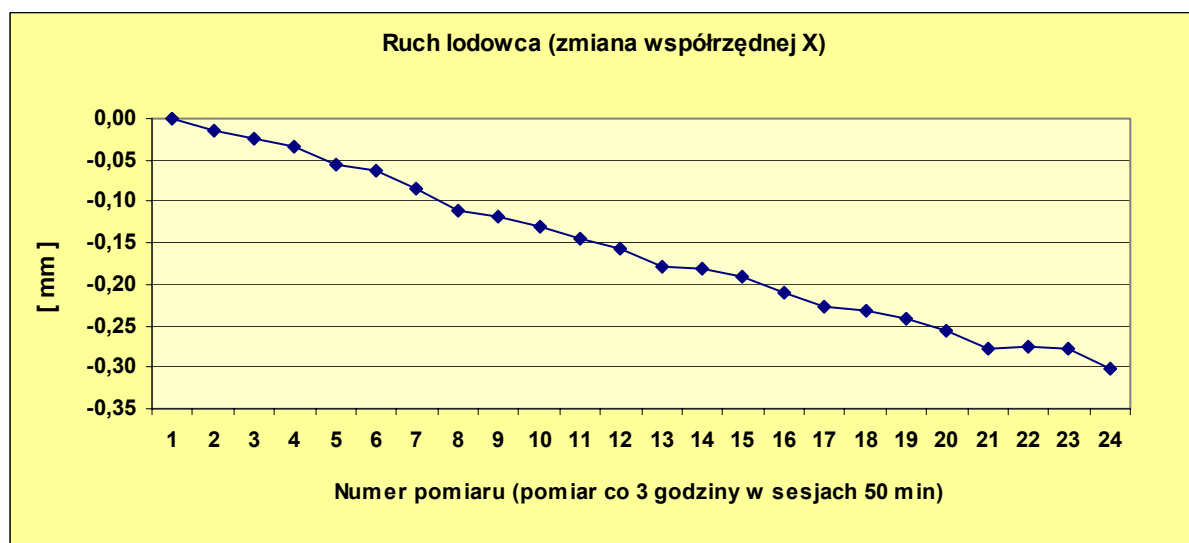
Rys. 5. Przeszczenia poziome czwartej tyczki ablacyjnej w kolejnych epokach obserwacyjnych

**Tabela 1.** Zestawienie przemieszczeń i ablacji tyczek ablacyjnych w stosunku do epoki wyjściowej (28 czerwiec 2005)

Numer tyczki	Epoka2 (5.07.05)				Epoka3 (18.07.05)				Epoka4 (22.07.05)				Epoka5 (26.07.05)			
	d_A [m]	dX [m]	dY [m]	dH [m]	d_A [m]	dX [m]	dY [m]	dH [m]	d_A [m]	dX [m]	dY [m]	dH [m]	d_A [m]	dX [m]	dY [m]	dH [m]
Hans 1	-0,25	0,02	0,08	-0,14	0,21	-0,68	-0,06	-0,69	0,04	-0,62	-0,07	-0,82				
Hans 2	-0,35	-0,57	0,52	-0,02	-0,93	-1,19	0,88	-0,78	-1,13	-1,20	0,79	-0,86				
Hans 3					-2,13	-6,67	-0,09	-1,40	-2,27	-7,43	-0,15	-1,62				
Hans 4	-0,25	-1,88	0,32	-0,50	-0,69	-4,39	0,88	-1,21	-0,70	-4,79	0,91	-1,36	-0,78	-5,15	0,96	-1,54
Hans 5	-0,30	-1,09	0,52	-0,44	0,17	-2,82	1,18	-0,45	0,06	-3,06	1,36	-1,17				
Hans 6	-0,33	-0,75	0,47	-0,42												
Hans 6	-0,25	-0,72	0,42	-0,39												
Hans 7	-0,27	-0,56	0,36	-0,39												
Hans 8	-0,39	-0,34	0,53	-0,29												
Hans 9	-0,36	-0,13	0,36	-0,53												
Hans 10	-0,52	-0,26	0,03	0,37												
Hans 11	-0,41	-0,04	-0,08	-0,59												
Hans K	-0,37	0,30	0,23	-0,42												

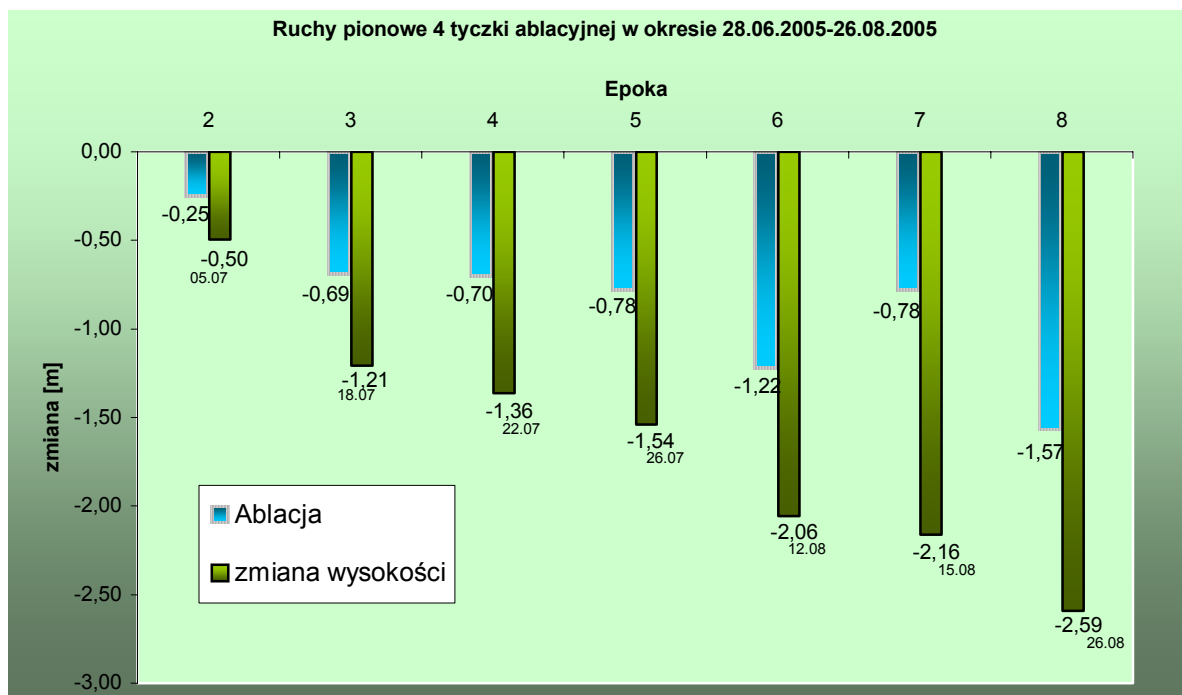
Numer tyczki	Epoka6 (12.08.05)				Epoka7 (15.08.05)				Epoka8 (26.08.05)			
	d_A [m]	dX [m]	dY [m]	dH [m]	d_A [m]	dX [m]	dY [m]	dH [m]	d_A [m]	dX [m]	dY [m]	dH [m]
Hans 1	-0,04	-0,72	-0,09	-1,33					-0,19	-0,89	-0,01	-1,83
Hans 2	-1,57	-1,31	0,92	-1,30					-1,98	-1,75	1,15	-1,73
Hans 3	-2,81	-10,38	-0,25	-2,23					-2,71	-12,64	-0,24	-2,66
Hans 4	-1,22	-6,42	1,08	-2,06	-0,78	-6,71	1,13	-2,16	-1,57	-7,67	1,25	-2,59
Hans 5	-0,68	-4,05	1,71	-1,56					-0,83	-5,00	2,23	-2,00
Hans 6	-1,41	-3,36	1,63	-1,55								

Dla zobrazowania ewentualnych zmian prędkości ruchu lodowca w ciągu doby wykonano cykliczne (w odstępach 3 godzin) pomiary 4 tyczki ablacyjnej (23-25 lipca 2005). Na rysunku 6 przedstawione są uzyskane wyniki, które wskazują na dość jednostajny ruch lodowca w cyklu dobowym wynoszący blisko 1 cm na godzinę.



**Rys. 6.** Przemieszczanie się 4 tyczki w ciągu 23 trzygodzinnych cykli pomiarowych

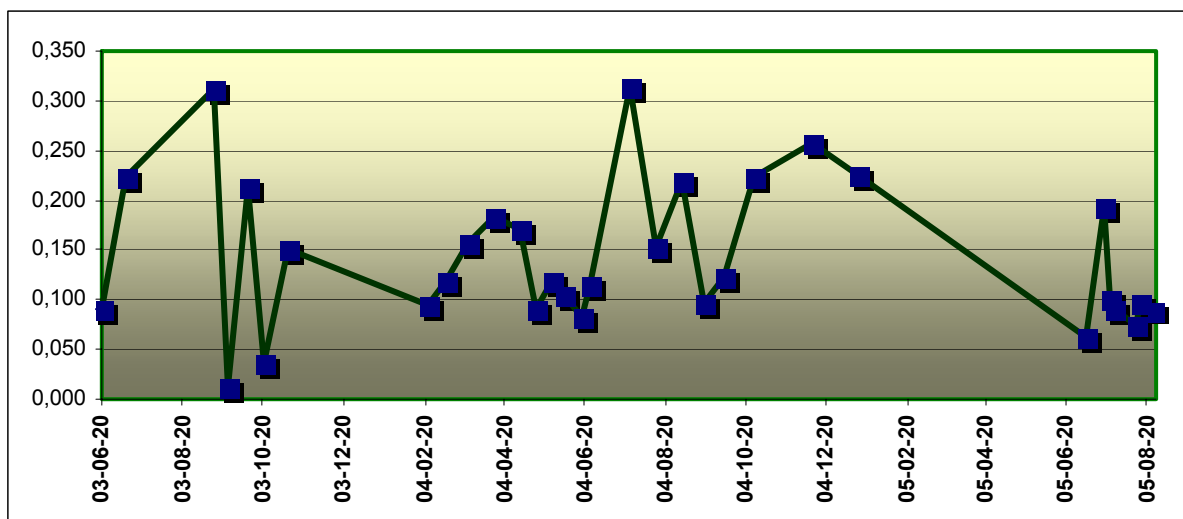
Dodatkowo wykonano porównanie wyników ablacji lodowca uzyskanej z bezpośredniego pomiaru przy tyczce (na podstawie pomiaru jej wysokości) oraz ablacji wyznaczonej w oparciu o satelitarny pomiar wysokości. Wyniki z obu sposobów pomiaru dość wyraźnie różnią się (por. rys. 7). Może to wynikać z faktu, że oprócz ablacji lodowca tyczka sukcesywnie wtapia się w lodowiec, co może powodować „zafalszowanie” wyników uzyskanych z pomiaru bezpośredniego. Podstawioną tu hipotezę należy zweryfikować w przyszłych pomiarach, zwracając uwagę na to, aby tyczka nie miała możliwości wtopienia się w lodowiec.



**Rys. 7.** Wielkość ablacji z pomiaru bezpośredniego i z pomiaru GPS

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.

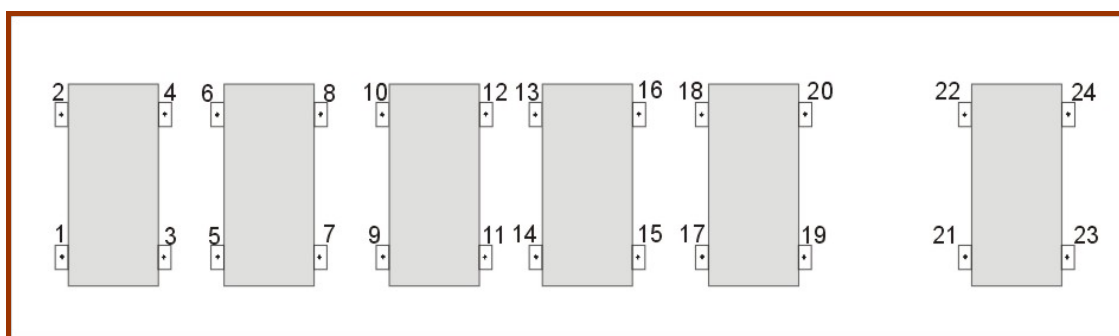


**Rys. 8.** Sezonowe zmiany ruchu lodowca Hansa (źródło: Puczko, 2004 i pomiary własne)

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 wyznaczone są rzadziej i analiza ich ruchu będzie możliwa po zebraniu całego materiału obserwacyjnego.

#### 4. Wyznaczenie osiadań zbiorników paliwowych Polskiej Stacji Polarnej

Kolejnym zadaniem realizowanym w czasie wyprawy było wyznaczenie przemieszczeń pionowych stóp fundamentowych zbiorników na paliwo na terenie Polskiej Stacji Polarnej PAN w Hornsundzie na Spitsbergenie. W tym celu wykonano pomiary niwelacyjne reperów kontrolnych od 1 do 24 zastabilizowanych w postaci znaków mosiężnych w 2004 roku podczas wyprawy dra M.Woźniaka oraz A.Adamka. Rozmieszczenie reperów na fundamentach zbiorników pokazane jest na rysunku 9.



**Rys. 9.** Rozmieszczenie reperów na stopach fundamentowych zbiorników paliwowych





**Rys. 10.** Pomiar wysokości reperów na stopach fundamentowych zbiorników paliwowych (fot. Z.Malinowski)

Znaki te zostały założone w celu długookresowego monitorowania stabilności zbiorników paliwowych za pomocą niwelacji precyzyjnej. Wszystkie pomiary zostały nawiązane do reperu Horr o wysokości 8.594 m n.p.m. osadzonego trwale w skale w bliskim sąsiedztwie Stacji Polarnej.



**Rys. 11.** Pomiary niwelacyjne wokół stacji Horsund (fot. M.Rajner)

Wszystkie obserwacje zostały wykonane za pomocą niwelatora precyzyjnego Ni004 i kompletu łąt inwarowych (rys. 11). Analiza materiału pomiarowego wskazuje, że uzyskany błąd średni wyznaczenia wysokości reperów nie przekracza  $\pm 0.2-0.5$  mm. Na dokładność uzyskanych wyników niekorzystnie wpływa podłoże, którego ledwie wierzchnia część w czasie pomiarów nie była zamrznięta. Takie podłoże nie gwarantuje stabilności instrumentu i łąt

podczas pomiarów. Uzyskane wysokości z pomiarów z 2005 roku zestawione z wynikami z pomiaru wyjściowego z 2004 roku pozwoliły wyznaczyć różnice wysokości reperów kontrolnych (tabela 2). Różnice te wahają się w granicach od  $-2,52$  mm do  $-0,43$  mm i wskazują na niewielkie osiadanie zbiorników paliwowych. Wartości przemieszczeń nie są jednak duże, a ponadto wszystkie zbiorniki osiadają dość równomiernie, a co za tym idzie osiadanie nie ma wpływu na bezpieczną eksploatację zbiorników.

**Tabela 2.** Zmiany wysokości reperów w fundamentach zbiorników paliwowych pomiędzy pomiarami w latach 2004 i 2005.

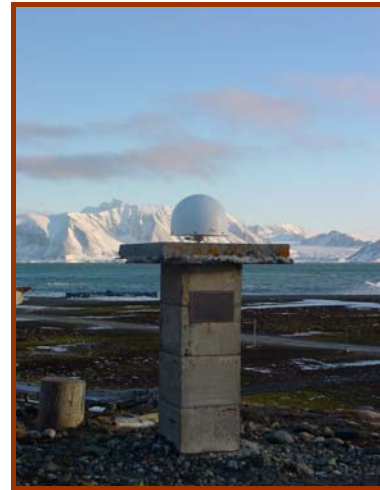
Data	Rp 1	Rp 2	Rp 3	Rp 4	Rp 5	Rp 6	Rp 7	Rp 8
lip-04 [m]	2,19978	2,19709	2,20125	2,19865	2,15888	2,14607	2,16090	2,14031
sie-05 [m]	2,19828	2,19484	2,19952	2,19613	2,15655	2,14409	2,15896	2,13851
dH [mm]	<b>-1,50</b>	<b>-2,25</b>	<b>-1,73</b>	<b>-2,52</b>	<b>-2,33</b>	<b>-1,98</b>	<b>-1,94</b>	<b>-1,80</b>

Data	Rp 9	Rp 10	Rp 11	Rp 12	Rp 13	Rp 14	Rp 15	Rp 16
lip-04 [m]	2,08657	2,06426	2,08028	2,05306	2,14521	2,11209	2,14237	2,10788
sie-05 [m]	2,08569	2,06330	2,07911	2,05209	2,14269	2,11075	2,14015	2,10690
dH [mm]	<b>-0,88</b>	<b>-0,96</b>	<b>-1,17</b>	<b>-0,97</b>	<b>-2,52</b>	<b>-1,34</b>	<b>-2,22</b>	<b>-0,98</b>

Data	Rp 17	Rp 18	Rp 19	Rp 20	Rp 21	Rp 22	Rp 23	Rp 24
lip-04 [m]	2,21199	2,18887	2,20848	2,18878	2,11308	2,10366	2,10968	2,10467
sie-05 [m]	2,20986	2,18820	2,20627	2,18732	2,11265	2,10268	2,10875	2,10344
dH [mm]	<b>-2,13</b>	<b>-0,67</b>	<b>-2,21</b>	<b>-1,46</b>	<b>-0,43</b>	<b>-0,98</b>	<b>-0,93</b>	<b>-1,23</b>

## 5. Stacja referencyjna – wstępne wyniki wyznaczeń

Opracowanie zawiera wstępną analizę wyników obserwacji satelitarnych GPS zbieranych przez stację permanentną założoną w październiku 2005 roku w pobliżu Polskiej Stacji Polarnej Zakładu Instytutu Geofizyki Polskiej Akademii Nauk. Antena ustawiona została w miejscu punktu astronomicznego, na którym Jasnorzewski (1959r) i Cisak (1984r) wyznaczyli szerokość i długość z pomiarów astronomicznych (CISAK I DĄBROWSKI, 1990). Lokalizacje anteny stacji permanentnej przedstawiają fotografie na rysunku 3. Na stacji zainstalowany został odbiornik Leica GRX1200 z anteną typu Choke Ring. Praca stacji referencyjnej sterowana jest przez oprogramowanie Spider firmy Leica. Szczegółowe informacje techniczne dotyczące stacji znajdują się w załączniku 2. Zamieszczone zostały tam również informacje dotyczące źródeł danych, które wykorzystane zostały w pracach obliczeniowych.



**Rys. 12.** Widok punktu astronomicznego przed zainstalowaniem anteny (lewa fot., Z.Malinowski) i po zainstalowaniu (prawa fot., A.Adamek)

Do opracowania obserwacji satelitarnych wykorzystane zostało oprogramowanie Bernese v. 5.0 z zastosowaniem tej samej strategii opracowania dla każdego dnia obserwacyjnego. Jako stacje odniesienia przyjęto trzy stacje pracujące w ramach sieci IGS, a mianowicie: TROMSO (TROM), NY ALESUND (NYAL) i KIRUNA (KIRU). W wyniku opracowania uzyskano wektory pomiędzy punktami odniesienia i stacją ASTR oznaczone odpowiednio: ASTR, ASNY i ASKI. W opracowaniu wybrano dane pomiarowe z okresu 01.11.2005-30.11.2005 (DOY:305-334) z pominięciem dnia 315 (brak danych dla stacji TROM).

Przed właściwymi obliczeniami, dobowe pliki wysłane zostały niezależnie do dwóch serwisów obliczeniowych: OGPSP (<http://ogpss.gjk.pw.edu.pl>, LIWOSZ, 2005) oraz AUSPOS (<http://www.ga.gov.au/bin/gps.pl>). Wszystkie dane zawarte są w załączonym arkuszu kalkulacyjnym MS Excel – ASTR ON-LINE. Warto jednak odnotować, że wyniki uzyskane z tych serwisów, mimo że dają współrzędne o dobrych parametrach takich jak RMS, nie wykazują spójności dla kolejnych dni. Wyniki są czasem obarczone błędem grubym. Uśrednione współrzędne uzyskane z serwisów *on-line* przyjęto do obliczeń jako współrzędne przybliżone (zobacz zestawienie poniżej lub plik ASTR/STA/ASTRCRD.CRD).

IGS00/ITRF00 COORDINATES BASED ON IGS01P37\_RS54.SNX/ITRF2000\_GPS.SNX 16-JUN-05

-----  
LOCAL GEODETIC DATUM: IGS00

EPOCH: 2000-01-01 00:00:00

NUM	STATION NAME	X (M)	Y (M)	Z (M)	FLAG
1	<b>ASTR</b>	<b>1386564.0254</b>	<b>385625.0795</b>	<b>6192855.4808</b>	
2	KIRU	2251420.8787	862817.1713	5885476.6489	ITR00
3	NYAL	1202430.5967	252626.6712	6237767.5599	IGS00
4	TROM	2102940.2847	721569.4102	5958192.1314	IGS00

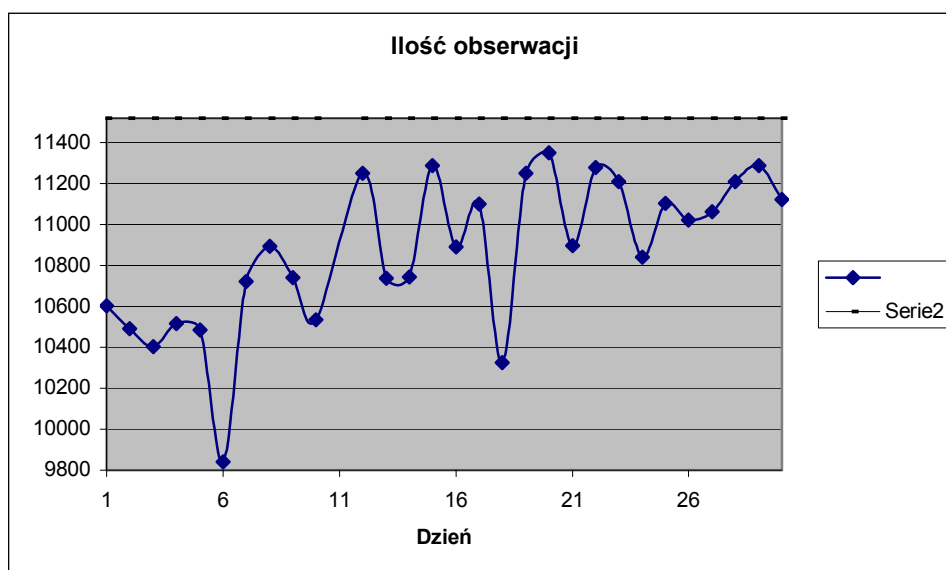
Z uwagi na to, że współrzędne pozostałych punktów (odniesienia) podane były na epokę 2000.0 obliczono ich współrzędne przybliżone na epokę pomiaru (/STA/APRYDDDD.CRD) używając znanych prędkości tych stacji (ASTR/STA/ASTRVEL.VEL) zestawionych poniżej.

LOCAL GEODETIC DATUM: IGS00

NUM	STATION NAME	VX (M/Y)	VY (M/Y)	VZ (M/Y)	FLAG	PLATE
-----	--------------	----------	----------	----------	------	-------

133	KIRU	-0.0147	0.0122	0.0116	IT00	EURA
206	NYAL	-0.0157	0.0082	0.0098	IG00	EURA
298	TROM	-0.0175	0.0103	0.0066	IG00	EURA

Po wstępnej analizie część obserwacji została wyłączona z dalszego opracowania. Jednak ilość obserwacji wyłączonych była niewielka, co dobrze świadczy o jakości obserwacji na punktach. Liczba „dobrych” obserwacji (teoretycznie plik dobowy z interwałem 30 s zawiera 2880 epok pomiarowych dla 4 plików jest to 11520 obserwacji na dobę) przedstawia wykres na rysunku 13.

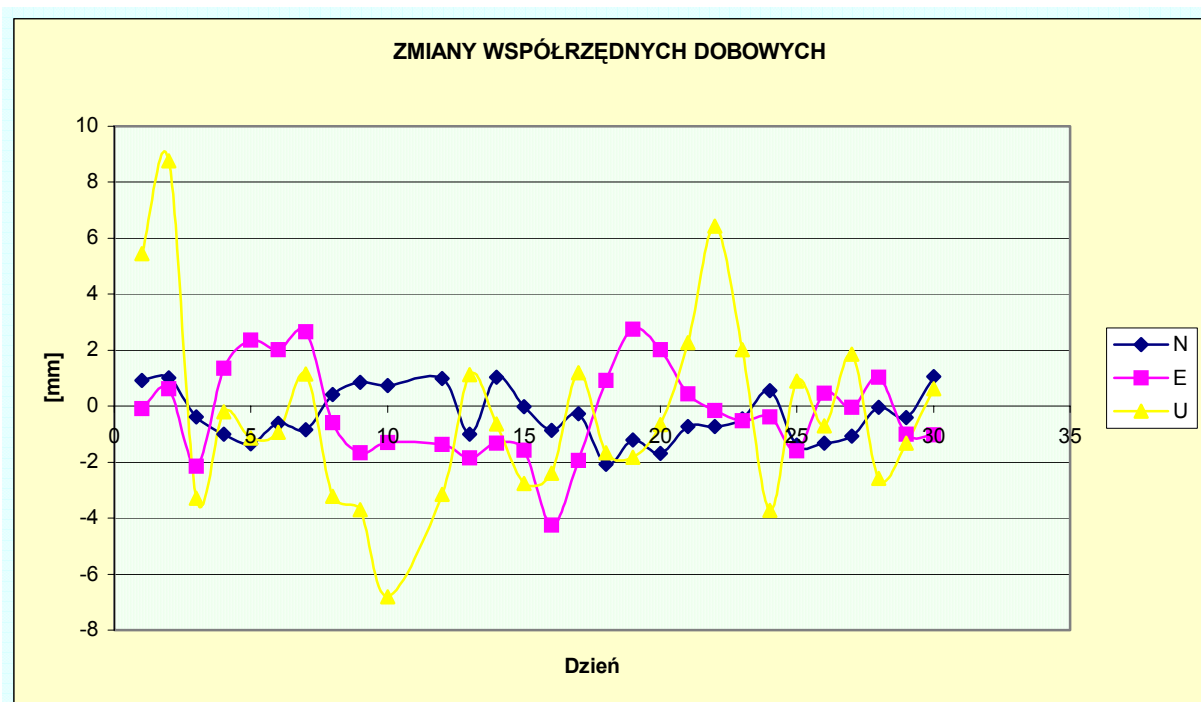


Rys. 13. Sumaryczna ilość obserwacji dla 4 analizowanych stacji (listopad 2005)

Ostateczne współrzędne obliczone zostały niezależnie dla każdego dnia obserwacyjnego zapisane są w zbiorach (ASTR/STA/FINYDDDD.CRD i ASTR/OUT/FINYDDDD.OUT). Ponadto w pliku (ASTR/SOL/FIXYYDDDD.NQ0) zapisane zostały równania normalne Porównanie zmian współrzędnych z rozwiązań dobowych zawiera tabela 3. Graficzna prezentacja wyników została pokazana na wykresie 14.

Tabela 3. Zestawienie różnic współrzędnych pomiędzy wartością średnią i z rozwiązań dobowych

ASTR	RMS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	13	14	15	16
N	0,99	0,93	1,01	-0,39	-1	-1,34	-0,62	-0,85	0,42	0,86	0,73	1,00	-1,00	1,04	-0,01	-0,86
E	1,67	-0,08	0,62	-2,14	1,35	2,37	2,01	2,65	-0,59	-1,67	-1,29	-1,37	-1,84	-1,32	-1,58	-4,25
U	3,28	5,44	8,76	-3,28	-0,21	-1,14	-0,93	1,15	-3,21	-3,7	-6,8	-3,16	1,12	-0,64	-2,77	-2,4
		17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
		-0,26	-2,07	-1,21	-1,69	-0,73	-0,72	-0,45	0,56	-1,39	-1,33	-1,08	-0,03	-0,41	1,05	
		-1,93	0,93	2,76	2,02	0,43	-0,16	-0,51	-0,38	-1,59	0,46	-0,05	1,04	-1,01	-1,02	
		1,2	-1,66	-1,82	-0,65	2,27	6,43	2,01	-3,72	0,89	-0,71	1,86	-2,59	-1,32	0,63	



Rys. 14. Wykres zmian współrzędnych w poszczególnych dobach obserwacyjnych

Z zestawienia dobowych równań normalnych otrzymano ostateczne współrzędne z miesięcznych obserwacji (/STA/FINAL.CRD i /OUT/FINAL.OUT) oraz błędy średnie ich wyznaczenia.

#### WSPÓŁRZĘDNE STACJI ASTR

X [m] 1386564,0275 ± 0,0002  
 Y [m] 385625,0868 ± 0,0001  
 Z [m] 6192855,4869 ± 0,0007

U 44,0364 m ± 0,0007 [m]  
 N 77° 0' 5",635842 ± 0,0002 [m]  
 E 15° 32' 31",483365 ± 0,0001 [m]

Stacja ta może służyć jako stacja bazowa przy różnicowych obserwacjach satelitar-nych. Może być ona wykorzystana do szybkiego wyznaczenia pozycji zarówno na lądzie (geodezja, glaciologia) jak i na wodzie (hydrologia, hydrografia). Oprócz zastosowań użytko-owych i doraźnych zbierany materiał obserwacyjny dostarcza wiele informacji, które mogą być wykorzystane do badaniach geodynamicznych, jonosfery, troposfery etc.

Najbardziej istotną i ciekawą informacją, którą można uzyskać na podstawie interpre-tacji wyników wyznaczeń zmian pozycji jest jej ruch wiekowy względem globalnego układu odniesienia. W powiązaniu z wyznaczoną prędkością w Ny Alesund pozwoli to na poznanie lokalnych ruchów Spitsbergenu. Oprócz wyznaczenia tylko wektorów translacji wyspy, moż-na będzie próbować „uchwycić” także jej obrót i ewentualne lokalne ruchy względne. Korzystne jest tutaj usytuowanie dwóch stacji w znacznym oddaleniu od siebie. Oczywiście ta-

kie analizy nie są możliwe natychmiast. Wstępne dane dotyczące ruchów dostępne będą po znacznie dłuższym okresie obserwacyjnym (rok i więcej). Już teraz po zaledwie jednym miesiącu obserwacji oszacowane zostały globalne ruchy stacji, ale z uwagi na krótki okres obserwacji nie są one jeszcze wiarygodne. Ruchy jakich należałoby się spodziewać można obliczyć przy pomocy modeli ruchów płyt tektonicznych np. NUVEL-1A, NNR-NUVEL 1A. Dla stacji ASTR (płyta euroazjatycka) są to wartości (obliczenia przy pomocy NUVELO - program pakietu Bernese rzędu 13 mm/rok w kierunku północnym i 14 mm/rok na wschód. Są to jednak modele wielkoskalowe, globalne, nie oddające lokalnych ruchów (dla przykładu modelowe ruchy NYAL wynoszą  $V_x = -16$ ,  $V_y = 10$ ,  $V_z = 3$ , gdy wyznaczone na podstawie wieloletnich obserwacji w służbie IGS wynoszą  $V_x = -16$ ,  $V_y = 8$ ,  $V_z = 10$  mm/rok!).

Obserwacje satelitarne ze stacji mogą być ponadto wykorzystywane do celów geofizycznych, klimatologicznych, meteorologicznych, etc. Podczas opracowania miesięcznych danych, przy wyznaczeniu współrzędnych stacji oraz ich powtarzalności, obliczone zostały także parametry troposferyczne takie jak całkowite opóźnienie troposferyczne (/OUT/FINYYDDD.TRP), które może służyć kolejnym badaniom (wilgotność, całkowita zawartość pary wodnej w troposferze, por. KRUCZYK, 2000). Badania takie, zwłaszcza w połączeniu z notowanymi na stacji danymi meteorologicznymi, mogą dawać bardzo dobre i wiarygodne wartości wyznaczeń parametrów troposfery. Można także pokusić się o analizy zmienności parametrów jonosfery (*TEC- Total Electron Content*), co także można wesprzeć pomiarami pozyskanymi z jonosondy pracującej na stacji.

## 6. Podsumowanie i wnioski końcowe

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 czasu rzeczywistego RTK, a w przypadku kiedy dostępność poprawki różnicowej będzie ograniczona (zasłonięcie przez góry), technologię szybką statyczną;
- ✓ 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.

Pomiary niwelacyjne wykonane na reperach osadzonych w fundamentach zbiorników paliwowych stacji wykazują niewielkie osiadanie zbiorników (rzędu 1-2 mm) w stosunku do pomiaru wyjściowego z 2004 roku. Takie przemieszczenia są na tyle małe, że nie zagrażają one to bezpiecznej eksploatacji zbiorników.

Analiza materiału obserwacyjnego ze stacji referencyjnej wskazuje na dobrą powtarzalność wyników wyznaczeń współrzędnych stacji w testowanym okresie (listopad 2005). Proponuje się jednak niewielkie zmiany w ustawieniach parametrów obserwacji:

- ✓ Z uwagi na fakt, że stacja permanentna GNSS spełnia istotną rolę nie tylko do dokładnego, globalnego wyznaczania pozycji, lecz również do szeregu analiz (meteorologicznych, geofizycznych, a także do kontroli samego systemu satelitów), należałoby rozważyć zmianę ustawienia kąta obcięcia horyzontu na  $0^\circ$  (możliwość odrzucenia obserwacji satelitów na małych wysokościach w procesie opracowania obserwacji).
- ✓ Do analiz długookresowych wystarczające są rejestracje 30 sekundowe (obecnie 5 sekundowe), które są standardem serwisu IGS (International GNSS Service), do którego planowane jest włączenie stacji (przynależność taka zmusi również do pewnych zmian organizacyjnych). Inną możliwością jest przejście na obserwacje jedno sekundowe, tzw. CGPS (Continuous GPS), ostatnio szeroko dyskutowaną strategią obserwacyjną, pozwalającą na wychwytywanie takich subtelności jak silniejsze trzęsienia Ziemi.
- ✓ Ze względu na bliską lokalizację budynku i metalowych masztów (możliwość wielodrożności sygnału), należy poddawać obserwacje wstępnemu opracowaniu.

## Literatura

- ADAMEK A. (2004), *Geodezja ekstremalna*, Magazyn Geoinformacyjny „Geodeta”, nr 12/2004;
- ADAMEK A. (2005), *Badanie dynamiki lodowców i struktur geologicznych na Spitsbergenie geodezyjnymi metodami klasycznymi i satelitarnymi*. Praca dyplomowa-magisterska, Warszawa, 2005
- CISAK, J., S.DĄBROWSKI, (1990), *Polish geodetic and cartographic studies in the Arctic and Antarctic regions*, Polish Polar Research, 11, 3-4, 1990,
- HUGENTOBLE, U., R.DACH, P.FRIDEZ I IN.,(2005), *Bernese GPS Software Version 5.0 DRAFT*, 2005  
<http://www.bernese.unibe.ch/docs/DOCU50draft.pdf>
- JANIA J. (1997), *Glaciologia*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997;
- KRUCZYK, M., (2000), *Comparison of IVW determining using GPS and radiosounding results*, Reports on Geodesy no. 8 (54), 2000.
- KURCZYŃSKI Z. (2003), *Studenci przemierzają Arktykę*, Magazyn Geoinformacyjny „Geodeta” nr 10/2003;
- LIWOSZ, T., (2005), *System automatycznego opracowania obserwacji GPS dla użytkowników indywidualnych*, Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, 2005;
- PACHUTA A. (1989), *Pierwsza wyprawa Wydziału GiK PW na Spitsbergen*, Przegląd Geodezyjny 1989, No 4-5 (18-21), Warszawa 1989;
- PACHUTA, A., K.PACHUTA, A.ADAMEK, J.WALO, M.WOŹNIAK, Z.KURCZYŃSKI, (2005): *Zastosowanie metody GPS w badaniach polarnych na Spitsbergenie*. Materiały z konferencji „Geodeticke siete a priestorove informacie”, Podbanske, 24-26 października 2005;
- PAŁUBSKI A. (2003), *Wyrównanie i analiza sieci punktów dla otoczenia fiordu Hornsund*, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 2003;
- SAGAN M. (2005), *Opracowanie zasięgu czoła lodowca Hansa na podstawie zdjęć wieloczasowych*, Wydział Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej, 2005;
- WALO, J., A.ADAMEK, A.PACHUTA, K.WĘZKA, Z.MALINOWSKI, M.RAJNER, (2005): *Badanie ruchu lodowca Hansa na Spitsbergenie*. Materiały z konferencji „Geodeticke siete a priestorove informacie”, Podbanske, 24-26 października 2005;

## Źródła internetowe:

1. <http://hornsund.igf.edu.pl/jono.html>
2. <http://igscb.jpl.nasa.gov>
3. <http://dgfi2.dgfi.badw-muenchen.de/geodis/GDYN/platemodels.html>



## **ZAŁĄCZNIKI**

**Załącznik 1. Dzienniki niwelacyjne z pomiaru przemieszczeń  
zbiorników paliwowych stacji**

## **Załącznik 2. Informacje dotyczące danych technicznych stacji referencyjnej oraz internetowe źródła danych**

### **INFORMACJE TECHNICZNE STACJI**

#### **1. Identyfikacja punktu**

Nazwa: ASTR  
Płyta tektoniczna: Euroazjatycka  
Przybliżone współrzędne:  
X [m] : 1386564,0  
Y [m] : 385625,1  
Z [m] : 6192855,5  
Szerokość : 77°00'05,636" N  
Długość : 15°32'31,482" E

#### **2. Dane dot. odbiornika GNSS**

Typ : LEICA GRX1200  
Rejestrowane sygnały : GPS  
Numer seryjny : 456660  
Maska [°] : 10

#### **3. Dane anteny GNSS**

Typ: LEIAT504  
Wysokość nad punktem (do podstawy anteny [m]): 0,0560

### **ŹRÓDŁA DANYCH**

Oznaczenia www - 4 cyfrowy numer tygodnia GPS; d - dzień tygodnia (0-6 Nd; 7-plik tygodniowy); ddd - 3 cyfrowy numer roku DOY (Day Of Year); yyyy - rok; ??? - 4 literowy skrót nazwy stacji

#### **Oryginalne dane**

<ftp://sersat.gik.pw.edu.pl> (login i hasło dostępne u autorów)  
pliki dobowe w formacie MDB (Leica) 5s (w opracowaniu danych pliki 30s)

#### **Dane obserwacyjne ze stacji odniesienia**

<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/data/daily/2005/ddd/05o>  
pliki dobowe, format RINEX, 30s

#### **Efemerydy**

<ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/product/www/IGSwww7.sp3>  
pliki dobowe, efemerydy precyzyjne - produkt końcowy IGS format SP3 (więcej inf. [2])

#### **EOP**

<ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/product/www/IGSwww7.ERP>

pliki tygodniowe, parametry orientacji Ziemi w formacie IERS

### **Zegary**

<ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/product/www/IGSwwwd.CLK>

Parametry chodu zegarów satelitów oraz stacji IGS

### **Stan jonosfery**

<ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/yyyy/CODwwwd.ION>

DO rozwiązania nieoznaczoności metodą QIF

### **Stacje IGS**

[ftp://ftp.unibe.ch/aiub/BSWUSER/STA/IGS\\_00\\_R.CRD](ftp://ftp.unibe.ch/aiub/BSWUSER/STA/IGS_00_R.CRD)

[ftp://ftp.unibe.ch/aiub/BSWUSER/STA/IGS\\_00\\_R.VEL](ftp://ftp.unibe.ch/aiub/BSWUSER/STA/IGS_00_R.VEL)

Współrzędne i prędkości stacji IGS

### **Inne**

<ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/yyyy/P1P2yymm.DCB>

dla wyznaczenia parametrów jonosfery

<ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/yyyy/P1C1yymm.DCB>

dla wyznaczenia parametrów zegarów

<http://www.aiub.unibe.ch/download/BSWUSER50/GEN>

informacje dotyczące satelitów, różnicy GPS-UTC, problemach systemu GPS, układów odniesienia, stałych fizycznych i in.

<http://www.oso.chalmers/~loading>

obliczenie efektu obciążeniowego pływów oceanicznych (M.S. Bos, H.-G. Scherneck) dla wybranych stacji dla wybranego modelu

[http://ssd.jpl.nasa.gov/eph\\_info.html](http://ssd.jpl.nasa.gov/eph_info.html)

Efemerydy planetarne JPL DE200