

Fotogrametryczny pomiar

Lodowce



Strefa czołowa lodowca Hansa – widok z góry Fugleberget w kierunku wschodnim w roku 1987...

ZDZISŁAW KURCZYŃSKI, MICHAŁ SAGAN

Obszary podbiegunowe to najczulsze strefy naszej planety. Mówi się o nich, że są „wylęgarnią pogody”. Tu właśnie można najwcześniej dostrzec symptomy globalnych zmian klimatycznych i ślady degradacji środowiska. W badaniach zjawisk polarnych, związanych z kondycją naszej planety, uczestniczą także geodeci.

● Polskie ślady na Spitsbergenie

Czasy wielkich ekspedycji naukowych i odkryć geograficznych odeszły w przeszłość. Z map niemal zniknęły „białe plamy”, wypełnione przez badaczy, którzy nadawali nazwy nowym lądom. Ale na obszarach arktycznych wiele miejsc zostało odkrytych i nazwanych zaledwie kilkadziesiąt lat temu. Polscy polarnicy, a wśród nich geodeci-fotogrametrzy, mają znaczące osiągnięcia w badaniu i kartowaniu Spitsbergenu Zachodniego – największej wyspy archipelagu Svalbard, położonego między 10° a 35° długości geograficznej wschodniej oraz 74° a 81° szerokości geograficznej północnej (patrz mapka na s. obok).

W 1932 r. w ramach II Międzynarodowego Roku Polarnego zorganizowano Polską Wyprawę Polarną na Spitsbergen, a kolejną już w dwa lata później. Obszarem badań była tzw. Ziemia Torella w południowej części wyspy, wówczas jeszcze „biała plama” na mapie. W skład siedmioosobowej ekspedycji weszli major Sylwester Zagrajski, odpowiedzialny za triangulację, oraz Antoni Rogala-Zawadzki zajmujący się fotogrametrią. Była to pierwsza polska wyprawa arktyczna z udziałem geodetów – udokumentowano wówczas niezbędność prac geodezyjnych w realizacji polarnych programów badawczych. Rogala-Zawadzki oraz Zagrajski przeszli do historii jako pierwsi Polacy, którzy wykonali pomiary geodezyjne i fotogrametryczne w Arktyce (ilustracja obok).

Ekspedycji tej zawdzięczamy wiele polskich nazw geograficznych na Spitsbergenie. Położone w centrum badanego obszaru główne pasmo górskie, obejmujące 76 km², nazwano Górami Józefa Piłsudskiego. Jego najwyższe szczyty to Ostra Bramatoppen (1035 m n.p.m.) i Wawel-



Tablica pamiątkowa ku czci Antoniego Rogala-Zawadzkiego i Sylwestera Zagrajskiego, pierwszych Polaków wykonujących pomiary geodezyjne i fotogrametryczne w Arktyce



zmian lodowca Hansa na Spitsbergenie

w odwróceniu



...i w roku 2003

toppen (935 m n.p.m.). Góry Piłsudskiego oblewają ogromne lodowce Zawadzki-breen i Polakkbreen, w otoczeniu których wznoszą się najwyższe w tej okolicy szczyty: Kopernikusfjellet (1035 m n.p.m.), Stanislawskikammen (970 m n.p.m.), Curie-Skłodowskafjellet (882 m n.p.m.) czy strzelisty masyw Polakkfjellet (805 m n.p.m.). Nazwy te zostały przyjęte przez Norweski Instytut Badań Polarnych.

Po wojnie polscy polarnicy wznowili prace w latach 1957-58 podczas III Międzynarodowego Roku Geofizycznego oraz w 1959 roku w ramach Międzynarodowej Współpracy Geofizycznej. Nad północnym brzegiem fiordu Hornsund zbudowano Polską Stację Polarną, w której zimę 1957/58 spędziło 10 osób. Po modernizacji, poczynając od 1978 r., w Stacji działają kolejne całoroczne wyprawy polarne Instytutu Geofizyki PAN, a w ich programie naukowym uwzględnia się pomiary geodezyjne i fotogrametryczne. Kilka z tych ekspedycji było nawet organizowanych i kierowanych przez geodetów.

● Hans – typowy lodowiec spitsbergeński

Hans, położony na północnym brzegu fiordu Hornsund, to najbardziej wysunięty na zachód lodowiec uchodzący do mo-

rza. Ma wspólny obszar akumulacji z Vangpeisbreen, który jest bocznym lodowcem Austre Torellbreen. Poprzez wielkie plateau firnowe Kvitungisen łączy się od wschodu ze swoim najbliższym sąsiadem – lodowcem Paierlbreen. Dodatkowo zasilany jest przez kilka

mniejszych lodowców. Ma 68 km² powierzchni, a jego jezior, długości około 16 km, spływa szeroką doliną, osiągając miąższość lodu nawet do 200 m. Od wschodu ograniczony jest masywem Sofierkammen (925 m n.p.m.) oraz górą Fannytoppen (412 m n.p.m.). Jego czoło ma

Zmiany klimatyczne a bilans lodowców

Lodowce tworzą się tam, gdzie roczne opady śniegu przewyższają ilość śniegu topniejącego, czyli w obszarach podbiegunowych i wysokogórskich powyżej tzw. granicy wiecznego śniegu. W lodowcu można wyróżnić dwie strefy: górną, czyli pole firnowe, oraz dolną, czyli jezior. W górnych partiach śnieg się gromadzi i pod wpływem ciężaru przekształca najpierw w firn, następnie w lód firnowy i wreszcie w lód lodowcowy. Jest to strefa akumulacji. Narastająca masa lodu pod wpływem sił grawitacji spływa w niższe partie terenu. Lód pod ciśnieniem zachowuje plastyczność i „wlewa” się w dolinę, tworząc jezior lodowcowy. W tej części pod wpływem topnienia, sublimacji, działania wód lodowcowych, cielenia się i innych czynników przeważają procesy ablacji, tzn. ubytku lodu.

Stosunek mas akumulacji do ablacji obserwowany w pewnym czasie określany jest jako bilans lodowca. Bilans jest dodatni, gdy przeważa akumulacja, jezior lodowca wówczas wy-

dłuża się, następuje transgresja lodowca. Przy ujemnym zaś lodowiec się skraca, wycofuje – mamy do czynienia z jego regresją.

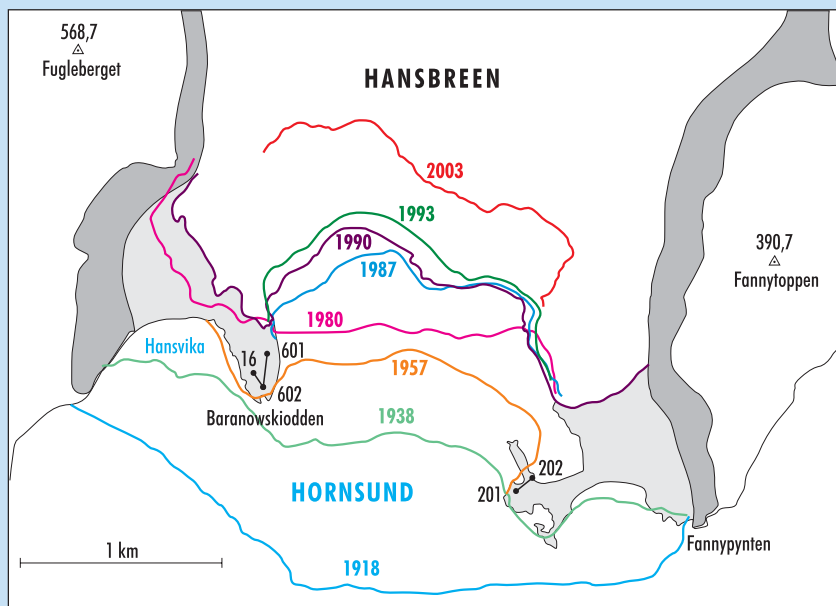
Bilans lodowców z uwagą obserwują nie tylko glaciolodzy. Jednym z ważniejszych powodów zainteresowania tym problemem jest związek między zachowaniem lodowca a zmianami klimatycznymi. Badając bilans, szczególnie w dłuższym okresie, specjaliści stawiają hipotezy dotyczące globalnych zmian klimatycznych, a te z kolei skłonni są łączyć z działalnością człowieka. Głośny jest problem emisji gazów cieplarnianych powodujących ocieplenie klimatu. Lodowce są bardzo czułym wskaźnikiem globalnych zmian. Jednocześnie naukowcy pragną zgłębić tajemnicze mechanizmów i skutków działalności lodowców. Przecież krajobraz prawie całej Polski został ukształtowany właśnie przez lodowce. Te procesy z naszej przeszłości można obecnie obserwować w rejonach arktycznych, a dla geomorfologa to jakby czytanie otwartej księgi. ■

formę pionowego klifu, tworzonego przez rozległe i potrzaskane ściany lodowe, które latem bardzo energicznie odrywają się od lodowca. Proces ten według terminologii glaciologicznej nazywa się cieleciem. Odrywające się od czoła bloki lodowe mogą osiągać wielkość nawet kilkupiętrowych kamienic. Zjawisku temu towarzyszy potężny grzmot, a okoliczne sejsmometry rejestrują lokalne trzęsienie ziemi. Czoło lodowca dochodzi do 60 m wysokości nad poziomem wody i rozciąga się na przestrzeni około 3 km, przy czym aktywna jest tylko jego środkowa część o długości około 2 km. Wschodnią i zachodnią krawędź tworzą strefy martwego lodu. Skraj czoła lodowca znajduje się blisko Stacji, niespełna 3 km na wschód od niej.

● **Pomiary lodowca**

Latem 2003 r. w rejonie fiordu Hornsund i Polskiej Stacji Polarnej operowała II Wyprawa Studencka na Spitsbergen [patrz GEODETA 11/2003 – red.]. Jednym z zadań naukowych tej ekspedycji był pomiar dynamiki czoła lodowca Hansa. Do jego realizacji zastosowano metodę fotograficzną, niewymagającą bezpośredniego dostępu do obiektu badań. Czoło lodowca zarejestrowano fototeodolitem Photoe 19/1318 na niskoczułych płytach szklanych o formacie negatywu 13 x 18 cm. Z bazy fotograficznej 16-602 – rozbitej i zastabilizowanej na skalistym Półwyspie Baranowskiego – wykonano dwie pary zdjęć: normalne i zwrócone w lewo. Zdjęcia na miejscu poddano standardowej obróbce fotochemicznej. Z tej samej bazy metodą wcięć kątowych wyznaczono również przestrzenne współrzędne kilku odfotografowanych na zdjęciach okolicznych szczytów, które w procesie opracowania stanowiły połowę osnowy geodezyjną – tzw. fotopunkty. Do oceny zmian czoła lodowca w dłuższym czasie – oprócz zdjęć z 11 września 2003 r. – wykorzystano również po cztery stereogramy z 10 września 1987 r. oraz z przełomu września i października 1993 r. wykonane z baz 601-602 oraz 201-202 i udostępnione przez IG PAN. Wszystkie zdjęcia zeskanowano w CODGiK na precyzyjnym skanerze z rozdzielczością 14 µm, a następnie poddano opracowaniu na fotograficznej stacji cyfrowej Z/I Imaging Intergraph. Sukcesem zakończyła się próba połączenia wszystkich zdjęć, wykonanych w różnym czasie i różnymi fototeodolitami, w blok wyrównany w jednym procesie obliczeniowym. Zdjęcia z jednego okresu zostały połączone ze

Cofanie się czoła lodowca Hansa w latach 1918-2003



Okres	Część zachodnia [m]	Część wschodnia [m]	Wartość średnia [m]	Średnia zmiana roczna [m/rok]
1987-1993	190	25-30	110	18
1993-2003	440	350	400	40
1987-2003	670	400	530	33

sobą poprzez pomiar kilkudziesięciu wspólnych punktów położonych zarówno na ścianie lodowej czoła, jak i na okolicznych górach. Zdjęcia z różnych okresów połączone ze sobą poprzez pomiar wspólnych punktów rozmieszczonych na szczytach. Orientację zewnętrzną całego bloku zagwarantowały współrzędne przestrzenne kilku szczytów, wyznaczone metodami geodezyjnymi. Taka metodyka opracowania zapewniła odniesienie wszystkich pomiarów do jednorodnego układu. Błąd średni wyrównania wszystkich zdjęć wyniósł 14,7 µm. Linie zasięgu czoła lodowca w poszczególnych stanach uzyskano poprzez stereoskopowy pomiar kolejnych par zdjęć. Definiowano je jako przecięcie powierzchni ściany czoła płaszczyzną poziomą na wysokości 10 m nad lustrem wody. Wyniki przedstawiono na ilustracji powyżej.

● **Analiza wyników i dokładności**

Zasięgi poszczególnych stereogramów w danym stanie w znacznym stopniu się pokrywały, uzyskiwano więc linie przebiegu czoła lodowca z dwóch stereogramów niezależnie. Rozbieżności między nimi dały podstawę do wiarygodnej oceny dokładności opracowania. Na tej pod-

stawie określono średni błąd położenia linii czoła lodowca w kolejnych trzech stanach – od 1,1 m (1987 r.) do 1,6 m (1993 r.). Wyniki te należy uznać za bardzo dobre.

Zdjęcia z 1987 r. były pierwotnie opracowane na autografie analogowym. Zasięg czoła lodowca Hansa w 13 rejestrowanych stanach przedstawiono graficznie w formie mapy w skali 1:5000. Dokładność tamtego opracowania oceniono na około 0,5 mm w skali mapy, tj. 2,5 m w terenie. Powtórne opracowanie tych samych zdjęć metodami fotogrametrii cyfrowej pozwoliło na porównanie wyników. Stwierdzono bardzo dużą zgodność przebiegu linii czoła lodowca w obu wariantach. Potwierdza to ich wysoką jakość oraz przydatność fotogrametrii dla realizacji takich zadań.

● **Dynamika lodowca Hansa**

Linie przebiegu czoła (ilustracja powyżej) pokazują stan lodowca na przestrzeni 85 lat (dane z lat 1918-1980 zaczerpnięte ze starszych materiałów kartograficznych). Bardzo wyraźnie widać, że Hans jest w stanie silnej regresji: największej w części zachodniej i mniejszej we wschodniej. Tabela (powyżej) ilustruje średnie cofanie się czoła w poszczególnych interwałach pomiarowych oraz śred-



FOT. MAREK WOŹNIAK

Interdyscyplinarność lodowa

Chyba niewiele osób w Polsce zdaje sobie sprawę, jak dużą rolę odgrywa geodezja w badaniach polarnych. Wszyscy naukowcy (biolodzy, klimatolodzy, geolodzy, meteorolodzy, sejsmolodzy itp.) wykorzystują w swojej działalności materiały kartograficzne.

Zdjęcia lotnicze są podstawą w opracowaniach dynamiki lodowców, monitoringu środowiska, w określaniu zjawiska geosukcesji lub też mogą być jedną z wielu warstw GIS. Obrazy satelitarne w różnych zakresach spektralnych są wykorzystywane do tworzenia cyfrowych modeli terenu (jako osnowa wydzielenia topoklimatycznych) czy spektrofotometrycznych analiz roślinności.

W Polsce prowadzi się wiele badań polarnych. Na przykład IGIK w Warszawie należy do grupy GSSG (Geoscience Standing Scientific Group), która uruchomiła dziewięć projektów naukowych w ramach programu GIANT (2004-2006). Prace obejmują m.in. wprowadzenie jednolitego geograficznego systemu odniesienia w Antarktyce, dostarczanie informacji dla rejestracji poziomych i pionowych ruchów Antarktyki, integracja programów GIS dla Antarktyki i udostępnianie danych potencjalnym użytkownikom. Badaniami polarnymi zajmuje się również Instytut Geofizyki PAN, który posiada własną stację na Spitsbergenie. Na tereny, gdzie dominującym krajobrazem jest lód, od wielu lat docierają geodeci. W proces poznawania terenów podbiegunowych włączają się także studenci. Owocem wyprawy na Spitsbergen zorganizowanej w 2003 roku przez Ogólnopolski Klub Studentów Geodezji przy SGP były prace dyplomowe napisane na podstawie przeprowadzonych podczas wyjazdu obserwacji. O tych i o innych ciekawych sprawach mówiono podczas seminarium naukowego „Interdyscyplinarne aspekty badań polarnych” (Warszawa, 4 marca), zorganizowanego przez Wydział Geodezji i Kartografii PW, Instytut Geofizyki i OKSG przy SGP.

Marek Pudło

nie zmiany roczne. Analizując dynamikę zmian, można stwierdzić, że średnie roczne wielkości cofania czoła lodowca były zdecydowanie większe w latach 1993-2003 niż w okresie 1987-93. Może to świadczyć o przyspieszeniu zmian. Należy dodatkowo zauważyć, że zachowanie Hansa jest typowe dla większości lodowców spitsbergeńskich, można więc mówić o dużej regresji w skali całego mikroregionu. Należy zauważyć, że podane wartości są daleko idącą generalizacją, zakładają bowiem ruch jednostajny czoła, co jest oczywiście uproszczeniem natury zjawiska. Prezentowane wyniki dotyczą zachowania się czoła w okresie wieloletnim. Na te zmiany nakładają się zmiany sezonowe, w cyklu jednorocznym. Podczas X Wyprawy Polarnej IG PAN badano zachowanie się czoła w cyklu jednego roku. Zdzisław Kurczyński i Stanisław Dąbrowski wykonali wówczas 13 rejestracji od lipca 1987 r. do lipca 1988 r. Unikalność tego pomiaru polegała na tym, że w cykl badań włączono porę zimową, w tymnoc polarną. Otrzymane wyniki wykazały, że czoło lodowca w porze letniej, tj. od lipca do przełomu października i listopada, cofało się: w strefie zachodniej 30-75 m, a w strefie centralnej 40-115 m. Związane to jest z silną ablacją wywołaną cieleciem się lodowca. W porze zimowej, tj. od przełomu października i listopada do przełomu czerwca i lipca roku następnego, widoczny jest bardzo równomierny tzw. awans czoła, wynoszący w strefie zachodniej 80-90 m, a w strefie centralnej – 100-115 m. Oznacza to, że średnie tempo awansu strefy centralnej w tym okresie wyniosło około 50 cm na dobę. Do oceny bilansu lodowca, oprócz informacji o zachowaniu się czoła, ważny jest pomiar prędkości jego spływu. Podczas wspomnianej wyprawy mierzono prędkość spływu powierzchniowego na profilu poprzecznym zastabilizowanym na lodowcu ponad kilometr powyżej czoła, tj. poza strefą szerokich szczelin. Wielokrotna rejestracja tego profilu pozwoliła stwierdzić, że lodowiec płynie ze znaczną prędkością w środkowym nurcie i dużo wolniej po obu brzegach. W ciągu roku lodowiec przepłynął 70 m w środkowej strefie, tj. około 21 cm na dobę. Zaskakująca jest względnie duża stabilność prędkości spływu lodowca na przestrzeni roku. Okazuje się, że zimą niewiele odbiega ona od średniej rocznej. Powyższe wyniki wskazywać mogą na pozorną sprzeczność: prędkość spływu lodowca wyznaczona na profilu jest stabilna i wyniosła w nurcie środkowym około

21 cm na dobę, tymczasem awans czoła w porze zimowej wyniósł około 50 cm na dobę, tzn. przebiegał 2,5 razy szybciej. Skąd ta rozbieżność? Otóż ciąg punktów do pomiaru prędkości spływu powierzchniowego położony jest poza strefą silnych spękań, w miejscu, gdzie lodowiec stanowi względnie jednolitą, zwartą masę lodu. Sama strefa czołowa jest bardzo spękana – głębokie i szerokie poprzeczne szczeliny dzielą lodowiec na osobne bloki. W strefie bliskiej krawędzi czołowej wypełnienie objętości lodowca jest więc znacznie mniejsze niż poza nią. Spostrzeżenie to wyjaśnia w pewnym uproszczeniu mechanizm spływu lodowca: płynie on zwartą masą, a w strefie czołowej otwierają się szerokie szczeliny, dzielące lodowiec na bloki, których ruch jest znacznie szybszy od ruchu powyżej tej strefy. Do pełniejszej interpretacji tego zjawiska należałoby wziąć pod uwagę ukształtowanie podłoża, po którym spływa lodowiec, i jego miąższość w poszczególnych strefach. Opisany mechanizm, wraz z jego oceną ilościową, ma istotne znaczenie dla oceny bilansu lodowca. Jak widać, nie można oceniać objętości masy lodu traconej poprzez cielecie się lodowca, biorąc za podstawę same zmiany zasięgu jego czoła.

Należy w tym miejscu zwrócić uwagę na zachowanie ostrożności w ocenie stanu lodowca na podstawie porównania zasięgu czoła z obserwacji dwu- lub kilkuletnich. Obserwacje takie oparte są zwykle na rejestracji w porze letniej, tj. w okresie dużych i gwałtownych zmian linii czoła spowodowanych cieleciem. Bardziej miarodajne byłyby porównania między stanami zarejestrowanymi w porach względnego ustabilizowania się linii czoła, a więc od listopada do czerwca.

● Fotogrametria potwierdza regresję Hansa

Pomiary dynamiki lodowca Hansa obejmujące 16 lat pokazują, że lodowiec ten jest w stanie regresji. Tempo jego cofania się w ostatnich latach wzrosło. Otrzymane wyniki potwierdzają tendencję obserwowaną od prawie stu lat i są typowe dla całego regionu spitsbergeńskiego. Metody fotogrametryczne okazały się szalenie przydatne w prowadzeniu badań dynamiki lodowców. Dokładność uzyskanych wyników jest wprawdzie wysoka, jednak z uwagi na złożoną naturę mierzzonego zjawiska należy zachować dużą ostrożność z daleko idącymi uogólnieniami i interpretacjami. ■