



Zastosowanie technologii naziemnego skaningu laserowego do określenia dynamiki lodowca Hansa na Spitsbergenie

# ...TAM SKANER POŚLE

Historia monitorowania lodowca Hansa sięga już stu lat. W tym czasie wykorzystano wszystkie dostępne geodezyjne metody pomiarowe, jednak żadna z nich nie była w stanie uchwycić skali występujących zjawisk z dostateczną łatwością i dokładnością. Czy naziemne skanowanie laserowe sprostą temu wyzwaniu?



Rys. 1. Lodowiec Hansa - widok z samolotu

FOT. UNIVERSITY OF LEEDS

ARTUR ADAMEK

Do niedawna fotogrametria była jedyną naziemną metodą pomiarową, która umożliwiała monitorowanie powierzchni trudno dostępnych obiektów. Dziś wielu specjalistów przewiduje jej schyłek w obliczu szybko rozwijającej się technologii naziemnego skaningu laserowego. Z licznymi zaletami skanowania (szybkość pomiaru, ilość pozyskiwanych obserwacji itp.) nikt już nie dyskutuje. Szeroki wachlarz aplikacyjny tej technologii zmienił oblicze badań prowadzonych również w Arktyce. Przykładem takiego zastosowania jest monitorowanie lodowców. W obliczu globalnych zmian klimatycznych i wzrastającej średniej rocznej temperatury topniejące w coraz szybszym tempie lodowce stały się bardzo ważnym wskaźnikiem tych procesów. Kontrola mas lodu odrywającego się od klifu lodowca i wpadającego do mórz może pomóc w określeniu zmiany tempa tych zjawisk. Realizowane w tym zakresie badania wymagają coraz dokładniejszych danych obserwacyjnych. Postęp widoczny jest zarówno na poziomie metodycznym, jak i technologicznym.

Mimo to lodowce i sama Arktyka wciąż pozostają jednym z najmniej zbadanych obszarów naszej planety. Charakter tego rejonu oraz specyfika jego obiektów

wymuszają poszukiwanie i stosowanie przez naukowców i specjalistów technologii, które spełnią obecne wyzwania badawcze. Ośrodkiem, który od wielu lat wspomaga merytorycznie i sprzętowo Polską Stację Polarą na Spitsbergenie, jest Wydział Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej. W wyniku współpracy tej uczelni z Instytutem Geofizyki PAN do badań glaciologiczno-środowiskowych został zaimplementowany naziemny skaningu laserowy.

## • CEL PROJEKTU

Pomiary geodezyjne prowadzone były latem 2009 roku w bliskim sąsiedztwie Polskiej Stacji Polarnej im. Stanisława Siedleckiego w Hornsundzie na Spitsbergenie. Ich głównym celem była realizacja nowatorskiego w skali Svalbardu projektu pn. „Opracowanie kompleksowego numerycznego modelu terenu (NMT) lodowca Hansbreen na podstawie naziemnego skanowania laserowego dla studiów nad dynamiką strefy czołowej lodowca (Hornsund, Spitsbergen)”. Pomiary lodowca Hansa są jednym z elementów programu WGMS (World Glacier Monitoring Service), do którego wybrano sto lodowców na świecie podlegających stałej obserwacji przez jednostki naukowe i stacje badawcze z różnych państw. W minionym, IV już Międzynarodowym Roku Polarnym, Hansbreen został wytypowany jako wzorcowy, z uwagi na

prowadzenie jego długoletnich i regularnych rejestracji terofotogrametrycznych.

Ze względu na dynamikę zachodzących procesów (największą w rejonie ujścia lodowca do morza) obszar skanowania obejmował czoło lodowca oraz jego powierzchnię sięgającą do około 4 km jego długości. Pozyskanie danych przestrzennych o dynamice powierzchniowych procesów zachodzących na tym modelowym lodowcu jest niezmiernie istotne dla przeprowadzenia szczegółowych analiz glaciologicznych. Oprócz dużej ilości powierzchniowych informacji, jakich dostarcza technika naziemnego skanowania laserowego, wciąż istotne do pozyskania pozostają „typowe” dane o stanie obiektu, tj.: położenie (zasięg) klifu lodowca, prędkość spływu powierzchniowego oraz jego kształt i miąższość. Do tej pory określano je na podstawie naziemnych pomiarów fotogrametrycznych [szerzej o stosowaniu tych metod w Hornsundzie pisze dr Leszek Kolondra w artykule „Stulecie pomiarów zmian położenia klifu lodowca Hansa (S-Spitsbergen)”, „Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji”, Vol. 17a, 2007].

## • METODYKA POMIARU

W latach 2007 i 2008 wykonane zostały pomiary testowe powierzchni lodowca przy użyciu skanerów bliskiego

i średniego zasięgu, odpowiednio: Z+F Imager 5006 oraz Riegl Z420i. Uzyskane dane oraz parametry techniczne wymienionych modeli potwierdziły możliwość wykorzystania skaningu w tym środowisku. Jednak ze względu na typ testowanych instrumentów oraz rodzaj i skalę obiektu ich głównym przeznaczeniem wydaje się jedynie rejestracja lokalnych zjawisk. Lodowiec, który ma blisko 3 km szerokości oraz prawie 15 km długości, wymaga użycia odpowiedniego narzędzia pomiarowego, adekwatnego do jego gabarytów. Powyższe wymagania spełnia skaner dalekiego zasięgu Riegl LPM-321. Charakteryzuje się m.in.: zasięgiem do 6 kilometrów, możliwością wyboru częstotliwości skanowania (1000, 100, 10 Hz), dokładnością pomiaru na poziomie 25 mm (według testów Riegla błąd średni pomiaru na odległości 50 metrów), pracą lasera w zakresie bliskiej podczerwieni (producent nie podaje dokładnej wartości długości emitowanej fali), możliwością jednorazowej rejestracji do 2 milionów punktów.

Eksperyment pomiarowy został zaprojektowany z myślą o uchwyceniu dynamiki obiektu w przestrzeni z uwzględnieniem czasu (4D), który jest tu bardzo istotnym czynnikiem. Lodowiec – mimo iż jest jednym z elementów środowiska abiotycznego – „żyje” i pozostaje w ciągłym ruchu (płynie). Dlatego ważne było wykonanie skanów na jak największej liczbie stanowisk w jak najkrótszym czasie. Na czas pracy instrumentu na punkcie wpływały m.in.:

- wielkość skanowanego obszaru – jednorazowo dochodziła do kilku kilometrów kwadratowych,
- odległość do obiektu – średnio wynosiła około 1500 metrów,
- częstotliwość pomiaru – wahała się od 1000 do 100 Hz w zależności od odległości do skanowanego obiektu (w praktyce zastosowano dwie częstotliwości: 1000 Hz dla odległości do 1500 metrów oraz 100 Hz dla większych).

## ● REALIZACJA PROJEKTU

Dysponując aktualnymi mapami oraz znajomością terenu, rozmieszczenie punktów pomiarowych zaprojektowano w miejscach, które spełniały następujące kryteria:

- dogodna i bezpieczna droga do punktów osnowy,
- odległość do obiektu nie większa niż 2 kilometry (najszybszy i najbardziej efektywny pomiar wymagał zachowania tego warunku),

- maksymalne pole widzenia obiektu (jak największy możliwy do pomiaru obszar lodowca),

- odpowiedni kąt padania wiązki lasera na powierzchnię lodowca (zbyt ostry kąt oznaczał brak odbicia, a zatem brak danych).

Dla horyzontalnych fragmentów powierzchni lodowca stanowiska skanera zostały umiejscowione na wzniesieniach górskich otaczających lodowiec. Powyższe warunki generowały czas pracy

na punkcie pomiarowym średnio od 4 do 6 godzin. Przy takim tempie skanowania nie było możliwe zrealizowanie pomiarów na więcej niż dwóch stanowiskach w ciągu jednego dnia. W efekcie wybrano 5 lokalizacji stanowisk skanera, które odpowiadały zakładanym warunkom oraz dawały gwarancję uzyskania odpowiedniego materiału obserwacyjnego (rys. 2).

Na każdym stanowisku określano następujące parametry pracy skanera:

- Zasięgi kątowe mierzonego fragmentu obiektu w pionie i w poziomie – zamontowana na skanerze luneta celownicza oraz dołączony joystick pozwalały na dokładne zdefiniowanie obszaru, który miał być przedmiotem pomiaru. Takie rozwiązanie pomaga ograniczyć czas pracy na stanowisku oraz już na wstępie wyeliminować teren, którego pomiarem nie jesteśmy zainteresowani.

- Odległość od obiektu – instrument wykonywał próbny pomiar, dzięki czemu łatwiej można było określić optymalną częstotliwość.

- Częstotliwość pracy instrumentu wybieraną z menu programu sterującego.

- Rozdzielczość liniową i kątową pomiaru określaną przez obserwatora (na podstawie pozostałych, wprowadzonych już parametrów program wylicza maksymalną możliwą do osiągnięcia rozdzielczość pomiaru – średnia liniowa rozdzielczość pomiaru dla naszego obiektu wynosiła 30 cm).

- Warunki atmosferyczne (temperatura powietrza, ciśnienie oraz wilgotność) wprowadzane w celu określenia popraw-



Rys. 2. Lokalizacja stanowisk skanera w terenie

ki atmosferycznej do mierzonych odległości.

W terenie instrument sterowany jest poprzez kompleksowe oprogramowanie RiPROFILE firmy Riegl zainstalowane na notebooku podłączonym do skanera złączem sieciowym (Ethernet TCP/IP). Środowisko RiPROFILE zawiera algorytmy, które swoimi rozwiązaniami upraszczają realizowany pomiar i jego późniejsze opracowanie. Możliwość orientacji skanu przez określenie azymutu osi Y układu własnego skanera nie wymaga tradycyjnych metod wykonania nawiązań (określenia georeferencji). Kierunek ten odczytywany jest w terenie za pomocą ręcznego odbiornika GPS typu Garmin. Jest to jeden z kilku sposobów realizacji procesu rejestracji i transformacji skanów do globalnego układu współrzędnych we wspomnianym programie. W trudnych warunkach terenowych i przy sporych ograniczeniach logistycznych w środowisku arktycznym rozwiązanie to doskonale się sprawdza. Kolejny etap pracy na stanowisku to wyznaczenie pozycji skanera, którą określano za pomocą zestawu do pomiarów satelitarnych GNSS – Leica System 1200. Brak możliwości szybkiego powrotu do stacji, ograniczona pojemność źródeł zasilania oraz niskie temperatury powietrza to czynniki, które wymuszały naszą szczególną uwagę podczas przygotowania zaplecza sprzętowego na czas pomiarów.

W celu weryfikacji wykonanych pomiarów oraz rejestracji procesów za-



FOT. WOJCIECH KRAWIEC

Rys. 3. Skaner na stanowisku pomiarowym

chodzących w strefie czołowej lodowca skany wykonano w trzech seriach pomiarowych, odpowiednio: 24 sierpnia, 7 września i 9 września 2009 r. W sumie powstało 25 skanów, które stanowią podstawowy materiał badawczy. Wytypowane terminy poszczególnych serii skanowania zostały dobrane w sposób pozwalający na uchwycenie dynamiki badanego obiektu. Dzięki zróżnicowanemu odstępom czasu można było sprawdzić, czy procesy zachodzące w obrębie lodowca są szybko-, czy wolnozmiennie. Terminy serii pomiarowych wynikały też z ograniczeń czasowych i pogody w czasie wyprawy.

#### ● OPRACOWANIE WYNIKÓW POMIARÓW

Prace terenowe dostarczyły bogatego materiału obserwacyjnego, który na-

stępnie poddano procesowi obróbki. Do analizy danych wykorzystywano firmowe oprogramowanie skanera. Przejście z chmury punktów do modelu wektorowego obiektu lub uzyskania wymodelowanej powierzchni wymaga realizacji szeregu czynności. Sprowadzają się one do wykonania rejestracji (transformacja), wyrównania, triangulacji (wygenerowania siatki trójkątów), a następnie modelowania lub analiz geometrycznych (przekroje, wymiarowanie, obliczenia powierzchni itp.). Każdy z etapów definiowany jest przez wiele parametrów zależnych m.in. od: wielkości opracowywanego obszaru, jego pokrycia punktami (pól martwych) i kąta nachylenia terenu. Do wspomnianych parametrów można zaliczyć: maksymalną długość boków budowanych trójkątów, maksymalny błąd realizacji tej konstrukcji, kąt roz-

warcia boków oraz (w niektórych przypadkach) obliczoną średnią odległość do opracowywanego obszaru.

To, co wyróżnia oprogramowanie Riegla w procesie opracowania skanów, to wspomniana możliwość wykonania rejestracji bez konieczności importowania jakichkolwiek punktów osnowy. Odbywa się to na podstawie wyznaczonych współrzędnych stanowisk skanera oraz odczytanych wartości azymutu dla poszczególnych pozycji instrumentu. Ułatwieniem jest również narzędzie do łączenia skanów z sąsiednich stanowisk bez georeferencji – *Multi Station Adjustment*. Funkcja ta w sposób automatyczny wiąże ze sobą powstałe na bazie chmur punktów obiekty (siatki). Algorytm przeszukuje obszary wspólnego pokrycia, mierząc odległości między tymi samymi elementami obiektów. W ten sposób określone są parametry obrotów dla poszczególnych macierzy odpowiednich skanów. Proces wykonywany jest metodą kolejnych przybliżeń, a jego efektem są wyrównane obserwacje wraz z charakterystyką dokładnościową. Wszystkie dane zostały przetransformowane do płaskiego układu współrzędnych UTM pas 33 strefa X. Średni błąd wzajemnego wpasowania chmur punktów po wyrównaniu nie przekroczył 16 centymetrów.

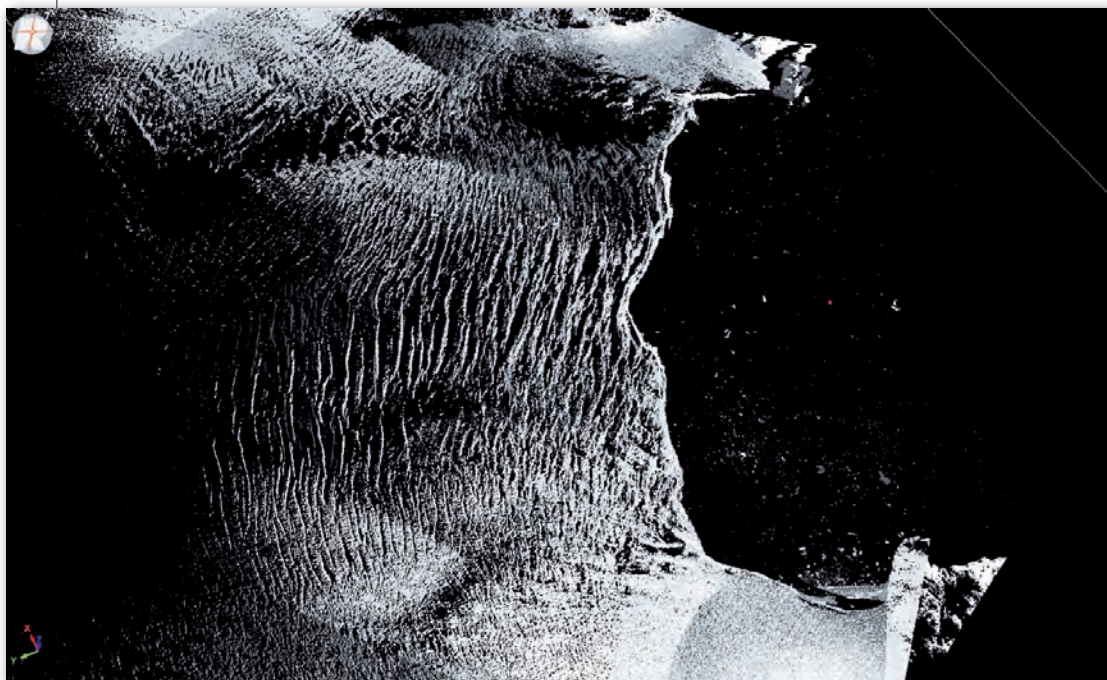
Opracowanie pozwoliło na wyznaczenie następujących średnich wartości:

- dobowej prędkości powierzchniowego spływu lodowca w jego głównym nurcie, która w badanym okresie wynosiła 50-70 centymetrów,

- przemieszczenia masy lodu strefy czołowej mierzonej po powierzchni: 10 metrów,

- zmian położenia klifu lodowca w badanym okresie (16 dni): do 50 metrów.

Dla wybranych części lodowca powyższe wartości będą różne i wynikają przede wszystkim z ukształtowania dna doliny, po której on się porusza, oraz odległości badanego obszaru do jego klifu. Im ta odległość mniejsza, tym wartości ruchu większe. Omówione procesy są bardzo złożone i wiele innych czynników, których tu nie wymieniono, ma również wpływ na zachowanie się tej potężnej masy lodu.



Rys. 4. Widok quasi-ciągłej powierzchni zeskanowanego lodowca reprezentowanej przez chmury punktów

Powierzchniowa rejestracja daje quasi-ciągłą powierzchnię, która bardzo wiernie oddaje rzeczywisty kształt obiektu (rys. 4). Dzięki temu wykonane przekroje poziome i pionowe klifu pozwalają na dalsze analizy geometryczne. Dotąd nie jest do końca wyjaśnione, co ma największy wpływ na kształt czoła lodowca. Być może dzięki dostarczonej obserwacji uda się odpowiedzieć na to oraz wiele innych nurtujących glaciologów pytań.

Na podstawie zgromadzonych danych został również opracowany NMT lodowca, który pozwoli na modelowanie jego powierzchni, głównie w celu określenia masy lodu odrywającego się od klifu. W opracowaniu modelu sporym problemem jest strefa czołowa, która jest bardzo silnie „uszczelniona”. Niestety, promienie lasera nie były w stanie dotrzeć w głąb lodowca i skaner zarejestrował tylko odbicia od płytkich brzegów widocznych szczelin. Martwe pola (brak danych), jakie powstały między zmierzonymi masami lodu, fałszują rzeczywisty kształt i obraz tej strefy. Bardzo trudny jest dobór odpowiednich parametrów, które pozwolą poprawnie wymodelować ten obszar. Przyjęty plan realizacji tego zadania uwzględnia kompromis pomiędzy

parametrami obrazowania a rzeczywistą jakością uzyskanych danych i kształtem wspomnianego fragmentu lodowca.

## • Z MYŚLĄ O MIĘDZYNARODOWYM PROJEKCIE

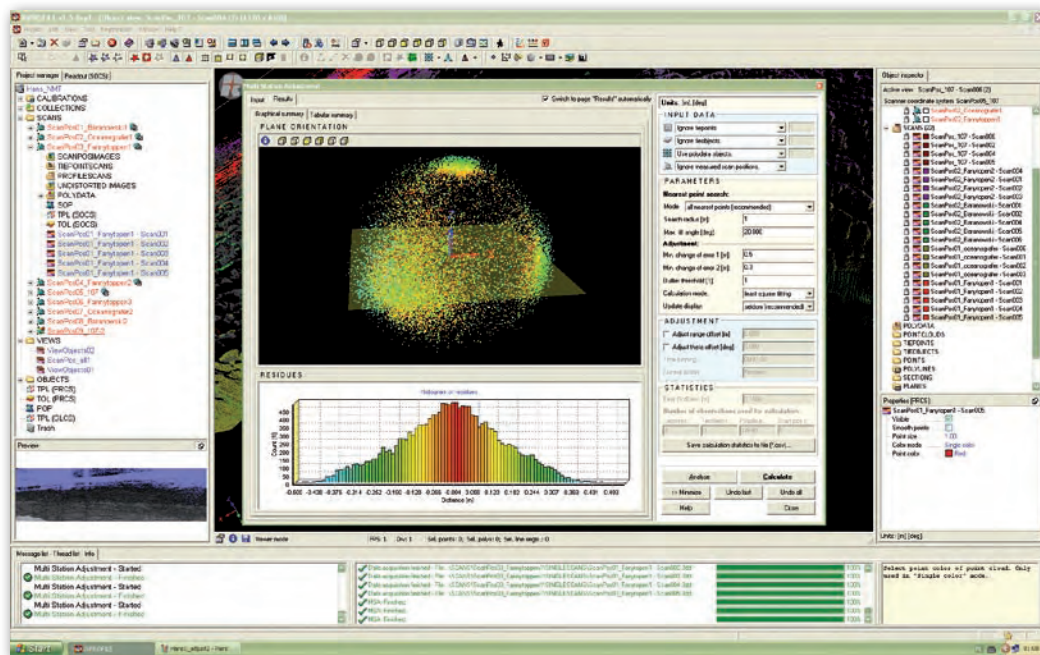
Dzięki zastosowaniu skanera o dużym zasięgu możliwe było kompleksowe uchwycenie stanu obiektu w danym momencie. Skaner Riegl LPM-321 spełnił swoją funkcję w pozyskaniu danych i pozwolił zarejestrować stan oraz ocenić

dynamikę mierzonego obiektu. Informacje pochodzące z przedstawionych analiz lodowca zostaną wykorzystane w badaniach glaciologicznych oraz klimatologicznych dotyczących recesji i topnienia lodowców, w tym kontroli poziomu wód oceanicznych. Przewiduje się możliwość zestawienia otrzymanych wyników z innymi obserwacjami geofizycznymi, co może przyczynić się do uzyskania odpowiedzi na liczne pytania dotyczące zjawisk zachodzących w obrębie lodowców.

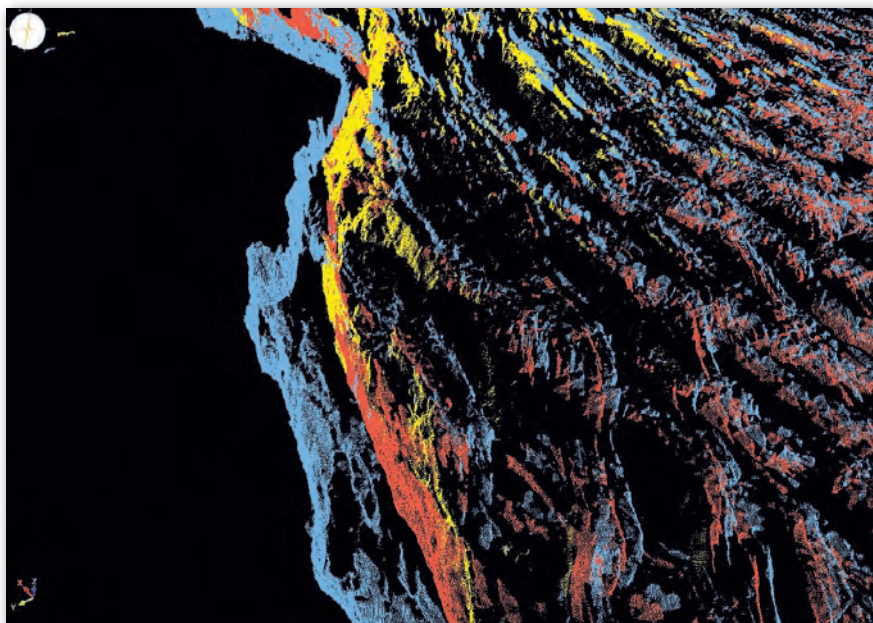
Doświadczenia zebrane w niniejszym eksperymencie posłużą do przygotowania międzynarodowego projektu dotyczącego czterowymiarowego dynamicznego modelu wybranych lodowców w europejskim sektorze Arktyki, którego koordynatorem ma szansę zostać Polska.

ARTUR ADAMEK

Projekt realizowany jest przez: Zakład Badań Polarnych i Morskich Instytutu Geofizyki PAN, Wydział Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej, Wydział Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego, Firmę Laser-3d Jacek Krawiec. W wyprawie udział wzięli: Ewa Gruszka i Artur Adamek (WGiK PW), Jacek Krawiec i Wojciech Krawiec (Laser-3d), Waldemar Klimek (INFOGEO). Niniejszy projekt jest współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, projekt „Program Rozwojowy Politechniki Warszawskiej”. Autor dziękuje firmie Riegl Laser Measurement Systems za wypożyczenie skanera oraz firmie PGI INFOGEO Sp. z o.o. z Katowic za pomoc w sfinansowaniu wyprawy.



Rys. 5. Zrzut z ekranu programu RiPROFILE – proces wyrównania skanów



Rys. 6. Prezentacja chmur punktów fragmentu strefy czołowej lodowca dla wszystkich serii pomiarowych (zrzut z ekranu programu RiPROFILE). Kolor granatowy – pierwsza seria pomiarowa, czerwony – druga i zielony – trzecia. Widoczny ruch lodowca i „cielenie się” klifu