



Poznań, 27.02.2017 r.

dr hab. Witold Szczuciński, prof. UAM  
Instytut Geologii,  
Uniwersytet im. A. Mickiewicza w Poznaniu

**Recenzja pracy doktorskiej**

**Pana magistra Oskara Głowackiego pt.**

***Zastosowanie metod akustyki podwodnej w badaniach procesów lodowych występujących w fiordach arktycznych na przykładzie fiordu Hornsund na Spitsbergenie***

1. Uwagi wstępne

Obserwowane nagłe zmiany środowiskowe wymagają coraz to bardziej kompleksowych i lepszych narzędzi monitoringu, szczególnie w rejonach, które uznaje się za potencjalne "tipping points" - punkty krytyczne, gdzie sprzężenia zwrotne mogą doprowadzić do gwałtownych zmian o trudnych do przewidzenia następstwach. Do wspomnianych punktów krytycznych należą strefy wzajemnego bezpośredniego oddziaływania lodowców oraz oceanu. Te oddziaływania przez dekady były generalnie pomijane w głównym nurcie rozważań glaciologicznych i oceanograficznych między innymi w związku z dużymi praktycznymi trudnościami w prowadzeniu badań w dynamicznie zmieniających się strefach cielenia, czyli odrywania się gór lodowych od lodowców i lądolodów. W ciągu ostatniej dekady nastąpił jednak przełom w uznaniu wzajemnej roli lodowców i oceanów oraz ich wspólnego wpływu na klimat. Temat ten należy do jednego z najintensywniej badanych w naukach o Ziemi, a każdy miesiąc przynosi nowe doniesienia naukowe w czołowych czasopismach. Na przykład, w ubiegłym miesiącu, pojawiła się praca autorstwa Webber et al. w *Nature Communications*, która opisuje fundamentalne znaczenie oddziaływania wód oceanicznych na recesję lodowca Pine Island Bay na Antarkydzie - lodowiec ten uważany jest za kluczowy w kontekście zmian poziomu morza w

najbliższych dekadach. Z kolei, Bassis et al. w artykule opublikowanym w *Nature*, ponownie zinterpretowali zdarzenia Heinricha - okresy gdy ogromne masy gór lodowych pojawiały się na północnym Atlantyku w późnym plejstocenie. Zaproponowali, że te zdarzenia o znaczącym wpływie na ówczesny klimat były przede wszystkim skutkiem wzmożonego cielenia czoła strumienia lodowego pod wpływem termicznego oddziaływania wód oceanicznych. Wnioski oparli zaś między innymi na nowych obserwacjach współczesnych czół lodowców uchodzących do morza. W ten bardzo dynamicznie rozwijający się nurt badań znakomicie wpisuje się rozprawa doktorska magistra Oskara Głowackiego.

Pan mgr Oskar Głowacki przedstawił jako rozprawę doktorską zbiór czterech, spójnych tematycznie publikacji poświęconych zastosowaniu metod akustyki podwodnej w badaniach procesów lodowych, ich ograniczeniom i potencjalnym nowym aplikacjom. Te ostatnie dotyczą szczególnie aspektu cielenia lodowców uchodzących do morza. Generalnym problemem badawczym jest poszukiwanie metod pomagających monitorować takie zjawiska jak obecność lodu na powierzchni fiordu arktycznego - w formie lodu morskiego lub gór lodowych i efektów ich rozpadu, częstotliwość i styl cielenia się lodowców oraz sezonowa stratyfikacja wód fiordowych wynikająca z dostawy wód roztopowych. Tematyka ta jest nowoczesnym kierunkiem badań i dotyczy zagadnień, o których dotychczasowa wiedza jest ograniczona a jednocześnie bardzo pożądana. Wszystkie przedstawione prace opierają się na materiale badawczym uzyskanym z fiordu Hornsund, jednego z najlepiej poznanych fiordów arktycznych, co pozwala na porównanie uzyskanych wyników z już istniejącymi danymi uzyskanymi innymi metodami. Artykuły składające się na rozprawę doktorską to następujące opracowania:

1. Głowacki O., and M. Moskalik (2014), **Application of passive hydroacoustics in the studies of sea-ice, icebergs and glaciers: Issues, approaches and future needs**, in *Geoplanet - Earth and Planetary Sciences: Achievements, History and Challenges in Geophysics*, edited by R. Bialik, M. Majdanski and M. Moskalik, 271–295, Springer-Verlag, Berlin, Germany, doi: 10.1007/978-3-319-07599-0.
2. Głowacki O., G.B. Deane, M. Moskalik, J. Tęgowski, and P. Blondel (2015a), **Two element acoustic array gives insight into ice-ocean interactions in Hornsund Fjord, Spitsbergen**, *Pol. Polar Res.*, 36(4), 355–367, doi:10.1515/popore-2015-0025.

3. Głowacki, O., M. Moskalik, G. B. Deane (2016), **The impact of glacier meltwater on the underwater noise field in a glacial bay**, *J. Geophys. Res. Oceans*, 121, doi:10.1002/2016JC012355.
4. Głowacki, O., G. B. Deane, M. Moskalik, P. Blondel, J. Tegowski, and M. Blaszczyk (2015b), **Underwater acoustic signatures of glacier calving**, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 804–812, doi:10.1002/2014GL062859.

Czasopisma, w których zostały opublikowane powyższe artykuły należą do bardzo dobrych (o wskaźnikach „impact factor” odpowiednio 1,182 dla *Polish Polar Research*, 3,318 dla *Journal of Geophysical Research Oceans* i 4,212 dla *Geophysical Research Letters*) i zostały właściwie dobrane do tematyki poszczególnych artykułów. Rozprawę doktorską uzupełniają streszczenia i wstęp w języku polskim i angielskim oraz oświadczenia o wkładzie poszczególnych autorów.

## 2. Opis przedstawionej rozprawy i wkładu autorskiego

Przedstawiona praca obejmuje wyniki badań procesów w środowisku fiordu arktycznego z wykorzystaniem metod akustycznych uzupełnionych danymi z obserwacji terenowych, pomiarami oceanograficznymi, wykorzystaniem zdjęć satelitarnych i poklatkowych oraz analizą uzyskanych danych z wykorzystaniem modelowania numerycznego. Wyniki te są nowe, interesujące, a zastosowane podejście badawcze cechuje kompleksowość podejścia - od analizy dotychczasowych aplikacji metod akustycznych w rejonach polarnych, przez zdefiniowanie potencjalnych przeszkód i problemów badawczych, do ich systematycznego rozwiązania.

Rozprawa doktorska rozpoczyna się jednostronicowymi streszczeniami w języku polskim i angielskim oraz krótkim, również dwujęzycznym, wstępem będącym rozszerzonym streszczeniem pracy. Merytorycznie jest on podzielony na trzy części. W pierwszej, Doktorant opisuje współczesny stan wiedzy oraz definiuje cel rozprawy doktorskiej. Według autora praca ma na celu "wykazanie potencjału metod podwodnej akustyki pasywnej w ilościowych badaniach procesów glacialnych w fiordach Arktyki". Druga część obejmuje systematyczny opis uzyskanych wyników, a trzecia podsumowanie. W tym ostatnim trafnie są podkreślone najważniejsze wyniki przeprowadzonych prac, do których należą:

- wykazanie, że metody akustyczne umożliwiają detekcję i identyfikację różnych typów cieleń lodowców,
- ujawnienie korelacji pomiędzy generowaną energią akustyczną a energią potencjalną upadających brył lodu,
- identyfikacja cieleń podwodnych z wykorzystaniem metod akustycznych,
- identyfikacja zakresu częstotliwości właściwego dla procesów zachodzących w strefie kontaktu lodowców i oceanu,
- rozpoznanie zależności powyższego od pokrycia powierzchni morza gruzem lodowym,
- wykazanie, że wody roztopowe tworzące charakterystyczną sezonową strukturę wód fiordowych służą jako przypowierzchniowy falowód koncentrujący energię akustyczną.

Załącznik 1, czyli pierwsza z publikacji składających się na rozprawę doktorską stanowi artykuł przeglądowy opublikowany jako rozdział w anglojęzycznej monografii "*Achievements, History and Challenges in Geophysics*" wydanej w serii *GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences*. Artykuł ten przedstawia systematyczny przegląd aplikacji metod akustycznych w badaniach związanych z lodem morskim, górami lodowymi oraz aktywnością procesów glacialnych. Zgodnie z oświadczeniami autorskimi, wkład własny pracy Doktoranta wynosił 95% i obejmował zarówno zasadniczą koncepcję pracy jak i jej napisanie. Wkład współautora ograniczał się do konsultacji i korekty tekstu. Autorzy sumiennie przytoczyli kluczowe wyniki z wielu prac stosujących pomiary akustyczne do badań lodu morskiego i gór lodowych. Najistotniejszym elementem pracy jest identyfikacja aktualnego stanu wiedzy, problemów do rozwiązania i możliwych implikacji zjawisk akustycznych w oceanach. Praca ta stanowi swoisty fundament dla kolejnych artykułów i świadczy o bardzo wszechstronnym poznaniu przez Doktoranta dotychczasowego stanu wiedzy, co umożliwiło mu podjęcie bardzo dobrze sprofilowanych badań skupionych na kluczowych do rozwiązania problemach.

Pierwszym z tych problemów była weryfikacja hipotezy o odmienności sygnałów akustycznych generowanych w wyniku procesów zachodzących u czoł lodowców uchodzących do morza w stosunku do innych źródeł dźwięku w środowisku fiordów polarnych. Wyniki wykorzystanych do tego celu pomiarów kierunkowych dźwięku zawarto w kolejnym artykule (załącznik 2) opublikowanym w *Polish Polar Research*. Wkład własny Doktoranta w powstanie artykułu został określony na 80% i obejmuje pomysł na badania, przeprowadzenie badań

terenowych, analizę uzyskanych danych i napisanie artykułu. Udział współautorów był ograniczony do korekt tekstu i udziału w dyskusji uzyskanych wyników. Badania terenowe przeprowadzane były we fiordzie Hornsund zarówno latem jak i na wiosnę i wykonane były z zastosowaniem zestawu odbiorników akustycznych (hydrofonów) o geometrii pozwalającej na określenie kierunku pochodzenia dźwięku. Analiza wyników wykazała, że dźwięki o częstotliwościach  $< 3$  kHz są przede wszystkim związane ze strefami kontaktu lodowców i wód fiordowych. Natężenie dźwięku w tym zakresie było z kolei zależne od występowania zjawisk cielenia lodowców oraz od wpływów wód subglacialnych i struktury gęstościowej wód fiordowych. Ten dobrze ilustrowany artykuł, nie tylko dał odpowiedź na postawioną hipotezę badawczą ale dał również podstawę do postawienia kolejnych, które były przedmiotem badań zaprezentowanych w kolejnym artykule.

Załącznik 3, to artykuł opublikowany w czasopiśmie *Journal of Geophysical Research: Oceans*. Udział Doktoranta określono w nim na 80% i obejmował pomysł na badania, kierowanie pracami terenowymi, analizę danych i napisanie artykułu. Wkład współautorów obejmował analizę danych oceanograficznych, dyskusję i znaczące korekty tekstu. W artykule tym połączono analizę danych pomiarowych oraz modelowanie. Autorzy wykorzystali pomiary akustyczne na różnych głębokościach, dane dotyczące zasolenia i temperatury wody, a uzyskane dane przeanalizowali stosując modelowanie numeryczne. Analiza rezultatów wykazała sezonową obecność bardzo istotnego falowodu związanego ze stratyfikacją termiczno-zasoleniową w wodach zatok przylodowcowych. Obecność tego falowodu w opinii autorów może mieć duże znaczenie dla żyjących tam organizmów.

Ostatni artykuł (załącznik 4) to praca opublikowana w *Geophysical Research Letters*. Doktorant deklaruje swój wkład w powstanie artykułu na 80%. Obejmował on stworzenie koncepcji badań, prace terenowe, analizę danych i pisanie artykułu. Wkład współautorów przejawiał się jako pomoc w pracach terenowych, pomoc w rozwoju modelu teoretycznego, udostępnienie danych GPS, dyskusja wyników i korekty manuskryptu. Opisanie w artykule eksperymenty bazowały na już uzyskanych wynikach opisanych w poprzednich artykułach. W tym przypadku autorzy skupili się na udanej próbie identyfikacji sygnałów akustycznych różnych typów cielenia lodowców. Powiązanie naziemnych zdjęć klifu lodowego z danymi akustycznymi dało możliwość bardzo dokładnego powiązania konkretnych zdarzeń z ich sygnałem akustycznym. Zidentyfikowano trzy

główne typy cieleń, w tym najmniej dotąd poznane cielenia podwodne. Uzyskane wyniki dają duże szanse na aplikację tych badań do ciągłego monitoringu lodowców uchodzących do morza.

### 3. Ocena merytoryczna pracy, uwagi i pytania

Przedstawiona przez Pana magistra Oskara Głowackiego rozprawa doktorska stanowi bardzo dobrze przygotowaną, spójną tematycznie pracę, która dotyczy interesującego i ważnego zagadnienia. Przedstawiona rozprawa jest bardzo starannie dopracowana pod względem edytorskim, graficznym i językowym – zarówno w częściach polskojęzycznych jak i anglojęzycznych. Dokumentuje ona również bardzo dobrą znajomość tematyki i literatury światowej przez Doktoranta, w której dobrze zakorzeniony jest problem pracy. Bardzo wysoko oceniam sposób podejścia do realizacji pracy z zastosowaniem zarówno badań terenowych jak i modelowania numerycznego. W przypadku obydwu podejść ujawnia się cenna oznaka dojrzałości i rzetelności naukowej jaką jest umiejętność krytycznej analizy własnych danych. W przypadku Doktoranta jest to szczególnie dobrze widoczne w dyskusji o jakości własnych danych terenowych i w analizie założeń i ograniczeń stosowanego modelu numerycznego. Podkreślić warto również trafne ujęcie w streszczeniu głównych osiągnięć pracy i dobry dobór wyników do prezentacji w artykułach, świadczy on o świadomym prowadzeniu badań z ukierunkowaniem na przetestowanie konkretnych hipotez badawczych a nie na proste kolekcjonowanie danych. Wysoko oceniam również umiejętność współpracy w międzynarodowym zespole oraz zdolność syntetycznego przedstawienia wniosków i sprawnego udostępnienia wyników społeczności międzynarodowej w postaci bardzo dobrych i przejrzystych napisanych artykułów naukowych. Ta ostatnia umiejętność we współczesnej nauce jest szczególnie pożądana.

W kontekście uzyskanych wyników warto podkreślić, że uzyskane odkrycia mają różnych charakter – jakościowy, ilościowy oraz aplikacyjny. W mojej opinii największe znaczenie mają badania, które pozwoliły na identyfikację akustyczną różnych typów cieleń lodowców. Wyniki te zostały zresztą również docenione w szerszym zakresie i były już nagłaśniane w popularnej formie między innymi przez kanał BBC. Monitoring cieleń się gór lodowych jest prowadzony również innymi metodami (sejsmicznymi, z użyciem teledetekcji), lecz jak dotąd nie pozwalają one na łatwe rozróżnienie typów cieleń – szczególnie tych podwodnych. Te ostatnie z kolei mają bardzo duże znaczenie w kontekście badań paleoklimatycznych. Modele klimatu opierają się w dużej mierze o

dane paleoceanograficzne, z których uzyskujemy również informację o obecności gór lodowych. Wykorzystywany do tego jest prosty wskaźnik – obecność ponadwymiarowych okruchów skał, tzw. zrzutków czyli ice rafted debris (IRD). Taki materiał nie jest jednak równomiernie rozmieszczony w lodzie lodowcowym. Najczęściej jest on tylko w spągowej warstwie lodu bogatej w osady. Można zatem zaryzykować hipotezę, że rozmieszczenie IRD w osadach oceanicznych jest w dużym stopniu funkcją kierunków dryfu i zasięgu nie wszystkich gór lodowych ale tych powstałych przez podmorskie cielenie lodowców. Zatem bardziej szczegółowy monitoring różnych typów cielenia i dryfu gór lodowych może wskazać na konieczność korekty dotychczasowych modeli.

Pomimo generalnie bardzo wysokiej oceny pracy, należy zwrócić jednak również uwagę na pewne kwestie dyskusyjne oraz nasuwające się pytania:

- 1) Analizowane przez Doktoranta zagadnienia dotyczące np. cielenia się lodowców czy procesów oddziałujących na góry lodowe metodami akustycznymi są przedmiotem badań również dla naukowców stosujących inne metody badawcze. Warto wspomnieć tu przede wszystkim metody z zakresu sejsmiki pasywnej, których stan zaawansowania przedstawili niedawno w obszernym przeglądowym artykule Podolskiy i Walter w *Review of Geophysics* (2016) oraz metody teledetekcyjne. W rozprawie doktorskiej niejednokrotnie są takie badania wspomniane, brakuje jednak próby zestawienia użyteczności metod akustycznych i sejsmicznych dla badania tych samych zjawisk. Byłoby to z pewnością użyteczne zestawienie, zwłaszcza w pierwszym przeglądowym artykule. Być może w przyszłości Doktorant pokusi się o próbę zestawienia zakresów stosowalności tych metod.
- 2) W przedstawionej rozprawie wielokrotnie Doktorant odnosi swoje badania do potencjalnej możliwości zastosowania ich dla stworzenia systemu monitoringu procesów cielenia lodowców oraz zlodzenia fiordów w oparciu o metody akustyczne. W przedstawionych artykułach znalazło się wiele wskazówek dotyczących zakresu proponowanych częstotliwości czy głębokości, na których powinny być hydrofony, zabrakło jednak spójnej propozycji jak taki system mógłby wyglądać w praktyce, z jakich elementów powinien się składać, czy powinien to być system oparty tylko o metody akustyczne czy może jednak o komplementarny zestaw różnych urządzeń (np. sejsmometry, radar)? Brak takiej propozycji nie umniejsza wagi przedstawionych wyników ale byłaby ona cennym uzupełnieniem.

- 3) Jedną z wskazówek sugerowanych przez Doktoranta dla instalacji systemu monitoringu dotyczy unikania płytkich głębokości z uwagi na obecność sezonowego falowodu związanego z wodami roztopowymi. Ta uwaga jest oczywiście zasadna w stosunku do monitoringu gór lodowych. Jednak z punktu widzenia monitoringu aktywności lodowca interesujące byłoby posiadać dane z obydwu głębokości bowiem intensywność i czas trwania wpływów lodowcowych zdaje się być równie istotnym elementem co cielenie gór lodowych.
- 4) W artykule stanowiącym załącznik nr 2 są wyznaczone kierunki z których pochodzą sygnały o poszczególnych zakresach częstotliwości. Z przedstawionych rycin (np. Fig. 9A) wynika, że interpretowane źródła (np. czoła lodowców) są często nieco przesunięte w stosunku do przedstawionych dominujących kierunków wynikających z pomiarów. Z czego może wynikać ta rozbieżność? Czy autorzy byli w stanie utrzymać na pontonie niezmienną pozycję w stosunku do kierunków świata w trakcie prowadzenia pomiarów? Jaki może być udział sygnału odbitego (od podwodnych stoków, czoł lodowców) na rozkład kierunków?
- 5) W artykule stanowiącym załącznik nr 3 wykonywano pomiary stacjonarne na jednej stacji przez ponad godzinę. Lokalizacja stacji pomiarowej jest w miejscu narażonym na dość silny prąd przypowierzchniowy, który może doprowadzić do dryfu łodzi. Czy łódź była zakotwiczona podczas pomiaru? Jeśli tak to na ile udało się uniknąć wpływu uderzających o ponton brył lodu na pomiary?
- 6) Doktorant podkreśla we wnioskach potencjalny wpływ obecności przypowierzchniowego falowodu akustycznego na organizmy morskie. Jednak warunki środowiskowe warunkujące występowanie falowodu (brakiczne i zimne wody powierzchniowe o wysokiej koncentracji zawiesiny mineralnej i ograniczonym dostępie światła) same w sobie stanowią już istotne czynniki stresu środowiskowego. Stąd wydaje się na obecnym etapie bardzo trudne do oszacowania na ile dodatkowy stres związany z podmorskim „hałasem” miałby wpływać na lokalne ekosystemy i w jaki sposób wyizolować jego wpływ.
- 7) Uzyskane interesujące wyniki dotyczące możliwości identyfikacji różnych typów cielenia lodowców na podstawie zapisu akustycznego skłaniają do zapytania czy w świetle uzyskanych wyników wydaje się możliwe również uchwycenie sygnałów poprzedzających





cielenie, który mógłby służyć z bardzo niewielkim nawet wyprzedzeniem jako sygnał ostrzegający przed takim zjawiskiem?

#### 4. Uwagi końcowe

Przedstawiona rozprawa doktorska Pana mgr Oskara Głowackiego wskazuje na znakomite opanowanie szeregu metod badawczych, bardzo dobrą znajomość literatury przedmiotu, umiejętność krytycznej dyskusji własnych danych i zestawiania ich z wynikami osiągniętymi przez innych badaczy oraz prezentacji uzyskanych wyników i odkryć międzynarodowemu gronu specjalistów.

Z głębokim przekonaniem stwierdzam więc, że **przedstawiona do recenzji praca spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim i zasługuje na wyróżnienie stosowną do rangi nagrodą**. Stanowi ona istotny, nowy wkład do dotychczasowej wiedzy i dowodzi, że Pan mgr Oskar Głowacki w pełni opanował umiejętność prowadzenia badań naukowych. Recenzowana praca spełnia zatem wymagania określone w "Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki" z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. z 2014r. poz.1852 i z późn. zm.). Tym samym wnioskuję o dopuszczenie mgr Oskara Głowackiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Witold Szczuciński