

Autoreferat

1. Imię i Nazwisko.

Michał Malinowski

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

2000 – mgr inż., kierunek górnictwo i geologia, specjalność geofizyka poszukiwawcza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

2006 – doktor nauk o Ziemi, rozprawa pt. „Dwu- i trójwymiarowe modelowanie struktury skorupy ziemskiej Polski południowej nad podstawie zintegrowanych metod sejsmiki refrakcyjnej oraz refleksyjnej”, Instytut Geofizyki PAN w Warszawie

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/ artystycznych.

2001-2006 Asystent w Pracowni Głębokich Struktur, Instytut Geofizyki PAN w Warszawie

2006 – nadal – Adiunkt w Zakładzie Sejsmicznych Badań Litosfery, Instytut Geofizyki PAN w Warszawie

4. Wskazanie osiągnięcia* wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego,

Zaawansowane metody przetwarzania i modelowania sejsmicznego dla obrazowania skomplikowanej budowy geologicznej i aplikacji poszukiwawczych

b) (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa),

[1] D. White, D. Secord, **M. Malinowski**, 2012, 3D seismic imaging of volcanogenic massive sulfide deposits in the Flin Flon mining camp, Canada: Part 1 - Seismic results, *Geophysics*, 77, WC47-WC58.

[2] **M. Malinowski**, E. Schetselaar, D. White, 2012, 3D seismic imaging of volcanogenic massive sulfide deposits in the Flin Flon mining camp, Canada: Part 2 - Forward modeling, *Geophysics*, WC81-WC93.

[3] D. White i **M. Malinowski**, 2012, Interpretation of 2D seismic profiles in complex geological terrains: Examples from the Flin Flon Mining Camp, Canada, *Geophysics*, 77, WC37-WC46.

[4] **M. Malinowski** i D. White, 2011, Converted wave seismic imaging in the Flin Flon mining camp, Canada, *Journal of Applied Geophysics*, 75, 719-730.

[5] **M. Malinowski**, S. Operto, A. Ribodetti, 2011, High-resolution seismic attenuation imaging from wide-aperture onshore data by visco-acoustic frequency-domain full-waveform inversion, *Geophys. J. Int.*, 186, 1179-1204.

[6] **M. Malinowski**, 2009, Structure of the crust/mantle transition beneath the Variscan foreland in SW Poland from coincident wide-angle and near-vertical reflection data, *Tectonophysics*, 471, 260-271.

[7] **M. Malinowski** i S. Operto, 2008, Quantitative imaging of the Permo-Mesozoic complex and its basement by frequency domain full-waveform inversion of wide-aperture seismic data from the Polish Basin, *Geophysical Prospecting*, 56(6), 805-825.

c) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Wstęp

Moje zainteresowania naukowe przed doktoratem (por. pkt 5.) związane były z modelowaniem i interpretacją danych pochodzących z głębokich refrakcyjnych i szeroko-kątowo refleksyjnych sondowań sejsmicznych. Zainteresowania te, jak wykazałem częściowo w pracy doktorskiej, ewoluowały w kierunku rozwijania metodyki modelowania i przetwarzania danych sejsmicznych, a w szczególności w łączeniu metod sejsmiki refrakcyjnej oraz refleksyjnej w badaniach o skali pośredniej między pracami czysto naukowymi a przemysłowymi. W tym kontekście szczególnie istotne było nawiązanie współpracy z zespołem kierowanym przez dr S. Operto z Francji, rozwijającym nowatorską metodę inwersji pełnego pola falowego. Rezultatem tej współpracy jest cykl dwóch prac wchodzących w skład mojego dorobku habilitacyjnego [5] i [7] oraz szeregu wystąpień konferencyjnych (w tym poszerzonych streszczeń: Malinowski i Operto, 2006; Malinowski i in. 2007b; Malinowski i in. 2009; Malinowski i in. 2011ab). Pracę [5] uważam za moje najważniejsze dokonanie naukowe. Praca [6] jest z kolei próbą zastosowania metod sejsmiki refleksyjnej do danych z głębokich sondowań sejsmicznych.

Poszukując nowatorskich i niekonwencjonalnych rozwiązań w zakresie badań sejsmicznych, wyjechałem na roczny staż podoktorski do Kanady (*Geological Survey of Canada, Ottawa*), gdzie zajmowałem się przetwarzaniem unikatowych danych sejsmicznych z rejonu Flin Flon (Manitoba, Kanada). Dane te zostały uzyskane w trakcie pomiarów w ramach rządowego programu zintegrowanych badań z zakresu różnych dziedzin nauk o Ziemi *Targeted Geoscience Initiative 3* poświęconego poszukiwaniom nowych złóż surowców mineralnych (rud metali). Badania prowadzone w Kanadzie kontynuowałem po powrocie do Polski, realizując prace naukowe nagrodzone stypendium HOMING przyznawanym przez Fundację na Rzecz Nauki Polskiej. Są to jedno z pionierskich badań w zakresie tzw. *hardrock seismic exploration*. Cztery spośród przedstawionych prac habilitacyjnych dotyczą tej tematyki (prace [1]-[4]), z czego trzy zostały opublikowane w specjalnym tomie czasopisma „*Geophysics*” poświęconemu „*Seismic methods in mineral exploration and mine planning*”. Dwie dalsze prace, nie ujęte w dorobku habilitacyjnym, zostały zaakceptowane do druku w specjalnym tomie czasopisma „*Economic Geology*”. Z tą tematyką związanych był także szereg wystąpień konferencyjnych, w tym poszerzonych streszczeń (Malinowski i in. 2008; White i in.,

2008; Malinowski i White, 2009, Malinowski i in. 2010, White i Malinowski, 2011; Malinowski i in. 2012).

W związku z gwałtownym rozwojem cywilizacji i nowymi wyzwaniami społecznymi w ostatnich latach obserwujemy zwiększone zainteresowanie dokładnym rozpoznaniem budowy skorupy ziemskiej metodami sejsmicznymi dla lokalizacji tego typu obiektów jak składowiska odpadów promieniotwórczych czy monitorowanie instalacji podziemnego składowania CO₂, oceny zagrożeń naturalnych czy też charakteryzowania zbiorników geotermalnych lub złóż. Obrazowanie sejsmiczne skomplikowanej budowy geologicznej wymaga jednak nowych technologii, dlatego też wspólnym mianownikiem prac przedstawionych przeze mnie jako osiągnięcie naukowe pt. **„Zaawansowane metody przetwarzania i modelowania sejsmicznego dla obrazowania skomplikowanej budowy geologicznej i aplikacji poszukiwawczych”** jest nowatorskie i niekonwencjonalne podejście zarówno do przetwarzania, jak i modelowania danych sejsmicznych, a także możliwość zastosowania wyników w poszukiwaniach złóż węglowodorów lub surowców mineralnych. Różne są natomiast obszary terytorialne badań – prace [1]-[4] dotyczą Kanady, prace [5]-[7] dotyczą obszaru Polski.

Omówienie prac [1]-[4]

Temat poszukiwania nowych złóż surowców mineralnych (głównie rud metali) za pomocą metod geofizycznych i rozwoju technologii z tym związanych z pozoru wydaje się być nieco osobliwy w warunkach polskich, choć jest to jedno z kluczowych zagadnień dla europejskiej nauki. Obecne wyzwania cywilizacyjne i rozwój technologii komputerowych powodują ogromne zapotrzebowanie na materiały mineralne, np. metale ziem rzadkich. Problem z ich dostępnością jest szczególnie widoczny na rynku europejskim, który zależy w głównej mierze od dostawców spoza Europy. O doniosłości tego problemu świadczą choćby niedawne wydarzenia z konferencji Europejskiej Unii Nauk o Ziemi (EGU) w Wiedniu w 2011 r., gdzie w ramach cyklu „*Great debate in Geosciences*” odbyła się dyskusja pt. „*How will Europe face the raw materials crisis?*”. Na tej samej konferencji była również zorganizowana sesja pt. „*Mineral systems: from geological, geochemical and geophysical data to metallogenic systems simulation*” (gdzie prezentowałem swoje wyniki), jak również „*keynote lecture*” niemieckiej organizacji rządowej „*Geotechnologien*” pt. „*Development of Technologies for the Efficient Exploration, Exploitation and Usage of Mineralogical and Metallic Resources*”.

Wspomniany program Kanadyjskiej Służby Geologicznej *Targeted Geoscience Initiative-3*, w którym pracowałem jako *post-doc*, zakończył się sporym sukcesem, a w dowód tego zespół biorący w nim udział został nagrodzony przez Ministerstwo Zasobów Naturalnych Kanady (2011 *Earth Sciences Sector Team Recognition Award* oraz 2012 *Departmental Achievement Award*). Wyniki projektu zostały także dostrzeżone na arenie międzynarodowej, co pozwala rozpocząć rozmowy związane ze wspólnymi inicjatywami w programach EU z wiodącymi ośrodkami europejskimi zajmującymi się podobną tematyką (np. Uniwersytet w Uppsali, Uniwersytet w Helsinkach).

Prace [1] i [2] dopełniają się wzajemnie. Praca [1] opisuje wyniki zdjęcia sejsmicznego 3D zrealizowanego w rejonie Flin Flon (Manitoba, Kanada), gdzie występują złoża

polimetaliczne (głównie Cu i Zn) pochodzenia wulkanicznego (tzw. *volcanogenic massive sulphides* = VMS). Ich obrazowanie stanowi duże wyzwanie dla metod sejsmicznych. Jest to związane z faktem, że ciała rudne zlokalizowane są w różnej generacji skałach wulkanicznych – od rjolitów do bazaltów, cechujących się dużymi prędkościami fal sejsmicznych ($V_p=6000-7000$ m/s) oraz dużą niejednorodnością i rozpraszaniem fal. Dodatkową komplikację stanowi fakt, iż skały te są silnie zdeformowane (upady do $45-60^\circ$), a miąższość soczewek zawierających minerały złożowe sięga maksymalnie 20-30 m. Opisane w pracy [1] zdjęcie sejsmiczne 3D (o powierzchni 17 km^2) jest pierwszym na świecie zrealizowanym z wykorzystaniem rejestracji trójskładowych (3-C) na potrzeby poszukiwania złóż metali. Zostało ono wykonane w trudnych warunkach środowiskowych – częściowo zlokalizowane na terenie miasta oraz działającej kopalni i huty, generujących silne zakłócenia. Dodatkową komplikację, szczególnie w przetwarzaniu, stanowiło zastosowanie mieszanych źródeł wzbudzania (wibrator, dynamit, air-gun). Pomimo tych przeszkód, udało się uzyskać dobre obrazowanie istniejących złóż (złoża Calinan oraz „777” oraz wytypować szereg stref anomalnych, stanowiących potencjalne cele wierceń poszukiwawczych (temu aspektowi poświęcona jest praca White et al. 2012, zaakceptowana do druku w specjalnym tomie *Economic Geology*). W przypadku płycej położonego złoża Calinan uzyskano wyraźną koncentryczną dyfrakcję na cięciu poziomym przez dane w wersji częściowej migracji (tzn. po DMO). W przypadku głębszej strefy „777”, odpowiedź w formie dyfrakcji jest trudna do prześledzenia. Wpływ na to miał zarówno fakt, iż złożo „777” położone jest pod miastem oraz częściowo pod jeziorem, a także zmiany litologii (udział rjolitu względem bazaltu) oraz skład mineralny złoża. Różnica w jakości obrazowania złóż Calinan i „777” stanowiła punkt wyjścia do modelowania sejsmicznego przedstawionego w pracy [2]. Jednym z najciekawszych wyników przedstawionych w niniejszej pracy jest wykrycie zmiany polaryzacji sygnału pochodzącego od jednej z soczewek złoża Calinan, w miejscu gdzie kontaktuje się złożo nienaruszone ze złożem wyeksploatowanym, wtórnie wypełnionym mieszaniną piasku i odpadów poflotacyjnych. Kontrast impedancji akustycznej jest dla obu stref tego samego rzędu – różnią się jedynie znakiem. Pokazuje to ogromny potencjał sejsmiki 3D w poszukiwaniu złóż.

Jak wspomniano powyżej, praca [2] stanowi kontynuację pracy [1], próbując wyjaśnić niejasności związane z obrazowaniem i interpretacją wyników sejsmiki 3D poprzez zastosowanie modelowania sejsmicznego. Jest to pierwsze tego typu zastosowanie modelowania sejsmicznego na dużą skalę w celu interpretacji zdjęcia 3D zrealizowanego na potrzeby poszukiwań złóż metali. Największym problemem związanym z modelowaniem było stworzenie odpowiedniego modelu sejsmogeologicznego. Punktem wyjściowym do jego konstrukcji był tzw. *geological knowledge cube* (Schetselaar i in., 2010; 2012), integrujący powierzchniowe kartowanie geologiczne, dane z otworów wiertniczych, interpretację sejsmiki 2D i 3D oraz modelowanie geostatystyczne. Model ten składał się z powierzchni opisujących główne kontakty geologiczne – do modelowania sejsmicznego niezbędny był model typu *volumetric*, zdyskretyzowany na regularnej siatce. W pracy opisano sposób konstrukcji takiego modelu i jego generalizacji z wykorzystaniem metod geostatystycznych. Modelowanie sejsmiczne zrealizowano za pomocą metody *phase screen* (Wild i in., 2000). Jej zaletą, w porównaniu np. z metodą różnic skończonych, jest relatywnie krótki czas obliczeń. Dzięki temu możliwe było

wykonanie symulacji danych typu *pre-stack* (pojedynczych kolekcji strzałowych). Dane te zostały następnie poddane przetwarzaniu podobnie jak dane rzeczywiste. W celu wyjaśnienia różnic w obrazowaniu ww. dwóch stref złożowych (Calinan oraz „777”), rozważono wpływ składu mineralnego złoża oraz litologii skały macierzystej. Te dwa czynniki okazały się kluczowe dla wyjaśnienia różnic w obserwowanej odpowiedzi sejsmicznej obu stref. Ważne wnioski z niniejszej pracy dotyczą migracji. Migracja typu *post-stack* zastosowana do zaszumionych danych po DMO, efektywnie poprawia stosunek poziomu sygnału do szumu. W przypadku danych syntetycznych, niemal identyczne wyniki osiągnięto, stosując migrację *post-stack* i *pre-stack*. W przypadku danych rzeczywistych, przedstawionych w pracy [1], migracja typu *post-stack* dawała jakościowo lepsze wyniki w stosunku do migracji *pre-stack*. Jest to prawdopodobnie związane z koniecznością regularyzacji danych, co jest trudne do osiągnięcia w przypadku skomplikowanego schematu akwizycji, typowego dla zdjęć sejsmicznych 3D realizowanego w warunkach *hardrock seismic exploration*. Końcowy wniosek z wykonanego modelowania dotyczy bezpośredniej lokalizacji potencjalnych stref złożowych. Zakładając, że model wykorzystany do generowania danych syntetycznych jest odpowiednio dokładny, anomalie zlokalizowane w danych rzeczywistych, a nie znajdujące odzwierciedlenia w danych syntetycznych, mogą reprezentować strefy mineralizacji.

W pracy [3] pokazano, w jaki sposób dane sejsmiczne 2D mogą zostać wykorzystane do przestrzennej lokalizacji obrazowanych struktur. W przypadku *hardrock seismic exploration* dane sejsmiczne 2D są najczęściej rejestrowane w ośrodku geologicznym będącym z natury trójwymiarowym. W związku z tym większość refleksów obserwowanych na sekcjach sejsmicznych 2D stanowi odbicia typu *out-of-plane*. Istnieje szereg metod, które pozwalają na uzyskanie informacji przestrzennej z danych sejsmicznych rejestrowanych w układzie geometrii typu *crooked line* (np. tzw. *cross-dip analysis*). W niniejszej pracy wykorzystana została migracja 3D typu *post-stack* danych 2D. Jest to podejście wykorzystywane bardzo rzadko, ze względu na fakt, iż dane 2D zawierają niewystarczającą informację typu *cross-dip*. Migracja 3D prowadzi do rozszerzenia refleksów obserwowanych na sekcji 2D na powierzchnie 3D - zgodne z czasem podwójnym danego refleksu na sekcji 2D. Zmigrowana powierzchnia 3D nie jest tożsama z granicą geologiczną w 3D. Stanowi ona przecięcie kontaktu geologicznego z nieznaną płaszczyzną obrazowania. Jeżeli dostępne są dane otworowe, można zweryfikować, czy dany kontakt geologiczny może być odpowiedzialny za otrzymaną odpowiedź 3D.

Dane wejściowe do migracji 3D stanowiły wyniki przetwarzania trzech wybranych profili 2D z rejonu Flin Flon (Malinowski i in., 2008). Wokół każdego z profili zostało skonstruowane mini-zdjęcie 3D o szerokości 1,8 km składające się z binów o rozmiarach 5 x 5 m. Oryginalne sekcje sejsmiczne 2D (po DMO) zostały poddane decymacji z 2.5 m na 5 m, a następnie trasy sejsmiczne zostały rozmieszczone w mini-3D, zgodnie z rzeczywistym położeniem punktów CDP wzdłuż profili. Następnie wykonano migrację 3-D (metodą *phase-shift*) ze stałą prędkością. Wyniki migracji w formie przekrojów wzdłuż (*inline*) i w poprzek (*crossline*) zmigrowanego zdjęcia 3D, zostały następnie porównane z danymi z otworów wiertniczych oraz z dostępnymi kontaktami geologicznymi (np.

położeniem ciał rudnych). W przypadku zakrzywionych trajektorii otworów (tzw. *deviated boreholes*) oraz silnie nachylonych granic migracja 3D pozwala na lepsze dowiązanie obserwowanej refleksyjności do danych otworowych. Jednym z rozważanych przykładów było także obrazowanie ciał rudnych, które położone są kilkaset metrów na zachód od nominalnej linii profilu, przy czym zapadają one nieznacznie w kierunku profilu. Jedyną możliwością, żeby je zobrazować, jest analiza refleksów typu *out-of-the-plane*. Analizując sekcję *inline* z migracji 3D, położoną 250-300 m na zachód od linii profilu, obserwuje się doskonałą korelację refleksów z geometrią ciał rudnych, potwierdzając tym samym, że profil 2D zobrazował te struktury. Ciekawym wnioskiem omawianej pracy jest możliwość zastosowania metody do analizy niezgodności danych na przecięciu profili (tzw. *misties*). Migracja 2D prowadzi do generowania refleksów, których upady nie są zgodne z prawdziwymi, jeśli refleksy te pochodzą od warstw, które cechuje silna składowa typu *out-of-the-plane*. Na przecięciu profili 2D dojdzie wówczas do niezgodności w położeniu takich refleksów. Analizując wyniki migracji 3D takich przecinających się profili, można znaleźć położenie, w którym zmigrowane refleksy będą zgodnie się przecinać, oraz wyznaczyć prawdziwą orientację takiego refleksu. Metodyka migracji 3D danych 2D może zostać wykorzystana wszędzie tam, gdzie zachodzi podejrzenie, że część refleksów stanowi energię typu *out-of-the-plane* (np. w Karpatach).

Praca [4] dotyczy przetwarzania fal przemiennych (konwertowanych P-S) wybranych profili sejsmicznych 2D z rejonu Flin Flon. Badania sejsmiczne zrealizowane w ramach programu TGI-3 stanowią unikatowy zbiór danych, ze względu na realizację pomiarów z wykorzystaniem trójskładowych czujników szerokopasmowych typu MEMS. Oprócz pracy Snydera i in. (2009) jest to jedyne znane do tej pory zastosowanie metody fal konwertowanych w powierzchniowej sejsmice na potrzeby poszukiwań złóż metali. Dużo miejsca poświęcono modelowaniu syntetycznemu (metodą różnic skończonych), by stwierdzić, czy przy istniejących kontrastach prędkości fal S możliwe jest uzyskanie wykrywalnej odpowiedzi sejsmicznej. Kontrasty w impedancji sejsmicznej fal S są dużo mniejsze niż w przypadku fal P, jednak ciała rudne składające się głównie z piritu powinny dawać relatywnie duże współczynniki odbicia (P-S). Inne kontakty litologiczne, np. rjolit/basalt, cechuje słaba odpowiedź sejsmiczna dla fal przemiennych P-S, która może być jednak wzmocniona w przypadku wystąpienia alteracji. Ważnym wnioskiem z modelowania jest także stwierdzenie, że pomimo iż energia P-S obserwowana jest na składowej pionowej, jest ona silnie zakłócona przez energię P-P, a zatem przetwarzanie fal konwertowanych zastosowane do danych tylko z pionowej składowej nie będzie efektywne. Bazując na powyższych wynikach, wykonano przetwarzanie fal konwertowanych dla wybranych 3 profili. Przetwarzanie to musiało zostać dostosowane do warunków geologicznych, tzn. dużych upadów i silnej niejednorodności. W takich warunkach klasyczne podejście do sortowania danych ze składowych poziomych w kolekcje asymptotycznych punktów wspólnego odbicia (*asymptotic common-reflection point* = ACRP) nie jest właściwe. Zgodnie z sugestią Den Rooijena (1991), transformacja danych do domeny ACRP może być osiągnięta poprzez zastosowanie operatora *dip-moveout* (DMO), dlatego też operator DMO dla fal konwertowanych został zastosowany dla danych posortowanych w zwykłe kolekcje wspólnego punktu odbicia (CMP). Innym ważnym elementem przetwarzania było wyznaczenie poprawek statycznych. Zaadaptowano tu procedurę Snydera i in. (2009), w której do składowej

radialnej aplikuje się najpierw statykę wyznaczoną dla fal P-P, a następnie statykę wyznacza się ręcznie z zsumowanych kolekcji wspólnego punktu odbioru (po korekcji typu *linear-moveout*). Alternatywnie dla schematu przetwarzania wykorzystującego operator DMO oraz migrację *post-stack*, wykonano także migrację typu *pre-stack*, w której wykorzystano różne stałe prędkości dla promieni fal P i powracających fal S. W niektórych przypadkach, migracja *pre-stack* dała nieco lepsze wyniki, pokazując np. refleksy, których nie było w klasycznym przetwarzaniu. Porównanie refleksyjności na sekcjach P-P z sekcjami P-S nie jest oczywiste. Generalnie refleksyjność na sekcjach P-S jest słabsza niż na sekcjach P-P, co wiąże się częściowo z faktem, iż dane P-S charakteryzują się niższym stosunkiem poziomu sygnału do szumu. Również refleksy o dużych upadach zdają się być wyraźniejsze na sekcjach P-P, jak również charakteryzują się zmianą nachylenia na sekcjach P-S. Jest to prawdopodobnie związane zarówno z różną wrażliwością poszczególnych typów fal względem kątów, pod jakimi oświetlane są elementy strukturalne lub też różnicami związanymi z próbkowaniem w poziomie (kolekcje wspólnego punktu głębokościowego dla P-P lub kolekcje wspólnego punktu konwersji dla P-S). Pomimo tych różnic część refleksów z sekcji P-S może być korelowana z refleksami na sekcji P-P, dzięki czemu w przybliżony sposób wyznaczyć można stosunek V_p/V_s , jako jeden z indykatorów litologicznych. Można zaobserwować wyraźną korelację wartości V_p/V_s z wydzieleniami geologicznymi i ich składem mineralnym, np. $V_p/V_s = 1.55-1.69$ stwierdzono dla kwaśnych skał magmowych, podczas gdy wartości rzędu 1.7-1.9 dla skał bardziej zasadowych. Należy podkreślić, że przedstawiona w niniejszej pracy metodyka przetwarzania fal konwertowanych może mieć zastosowanie do obrazowania skomplikowanej budowy geologicznej w innych rejonach i na potrzeby poszukiwania węglowodorów, np. w Karpatach.

Omówienie prac [5]-[7]

Podczas realizacji eksperymentu głębokich sondowań sejsmicznych SUDETES 2003 (Grad i in. 2003), zrealizowany został eksperyment sejsmiczny GRUNDY 2003 (Śliwiński i in., 2006; Malinowski i in., 2007a). Jego celem było przetestowanie możliwości obrazowania struktur podcechstyńskich za pomocą szerokokątowej sejsmiki niskoczęstotliwościowej. Unikatowy system pomiarowy dostarczył danych, które idealnie spełniały założenia odnośnie możliwości zastosowania inwersji pełnego pola falowego (długie offsety, niskie częstotliwości).

Począwszy od pionierskiej pracy Tarantoli (1984), na świecie rozwijane jest zaawansowane narzędzie służące do budowy modelu prędkościowego, jakim jest **inwersja pełnego pola falowego** (ang. **full-waveform inversion/tomography, FWT**). FWT wykorzystuje fakt, iż informacja o prędkościach fal sejsmicznych jest nie tylko zawarta w pierwszych impulsach fal załamanych, ale także w pełnym rejestrowanym polu falowym. Jednocześnie FWT jest techniką, która integruje w jednym algorytmie obrazowanie bazujące na falach załamanych (tomografia) z obrazowaniem bazującym na falach odbitych (migracja). Obrazowanie to cechuje się znacznie lepszą rozdzielczością w porównaniu do metod bazujących na teorii promieniowej (Virieux i Operto 2009).

Istnieje kilka zasadniczych problemów związanych z implementacją metody FWT na szeroką skalę. Pierwszy to brak odpowiednich danych. Sukces obrazowania za pomocą FWT polega na zastosowaniu jak najszerszego zakresu kątów, pod jakimi „oświetlane” są interesujące nas obiekty geologiczne. Wymagane dane muszą więc zawierać zarówno krótkie jak i najdłuższe offsety, które nie są rutynowo rejestrowane podczas prac sejsmicznych. Dodatkową przeszkodą jest konieczność rejestracji jak najniższych częstotliwości tak, by metoda FWT działała stabilnie. O ile współczesne systemy rejestrujące pozwalają rejestrować szerokie spektrum częstotliwości, o tyle wzbudzenie niskich częstotliwości (szczególnie w pracach na lądzie) pozostaje dużym wyzwaniem. Wiele dotychczasowych zastosowań FWT dotyczyło danych syntetycznych. Wyników zastosowania metody FWT do danych rzeczywistych jest wciąż niewiele, choć z roku na rok ich liczba wzrasta (spektakularny przykład 3D - Sirgue i in., 2010). Do roku 2008 w zasadzie istniały pojedyncze opublikowane przykłady zastosowania akustycznego wariantu FWT do danych polowych (Ravaut i in., 2004; Bleibinhaus i in., 2007; (Operto i in. 2006), w tym kontekście pracę [7] należy zaliczyć do pionierskiego etapu rozwoju zastosowań FWT. Obecny trend w rozwoju FWT związany jest z zastosowaniem tzw. inwersji wieloparametrowej w celu uzyskania większej ilości informacji niż tylko prędkość fal P. Praca [5] stanowi doskonałą ilustrację możliwości takiej inwersji.

W pracach [5] i [7] zająłem się możliwością zastosowania metody FWT do danych z wspomnianego eksperymentu GRUNDY 2003. Prace te są wynikiem rozpoczętej w 2005 roku współpracy z zespołem dr S. Operto z Francji i kierowanego przez niego, wspólnie z prof. J. Virieux, konsorcjum SEISCOPE. Jest to obecnie jeden z wiodących na świecie ośrodków akademickich rozwijających metodę FWT.

Praca [7] stanowi rozwinięcie prezentacji z konferencji EAGE w 2006 r. (Malinowski i Operto, 2006). Została ona opublikowana na zaproszenie w specjalnym tomie czasopisma „Geophysical Prospecting”, poświęconemu inwersji pełnego pola falowego. Jest to pierwszy przykład zastosowania metody FWT w Polsce, a także pierwszy przykład światowego zastosowania metody FWT do danych lądowych o offsetach do 50 km, rejestrowanych w warunkach głębokiego basenu osadowego (Basen Polski). Inwersję wykonano w wariantcie akustycznym, z modelowaniem w zakresie częstotliwości. W przetwarzaniu danych wejściowych do inwersji zastosowano podobną metodykę jak w pracy Ravaut i in. (2004), z wykorzystaniem normalizacji amplitud. Okno danych wykorzystane w inwersji było relatywnie wąskie. Zawierało ono pierwsze wstąpienia oraz odbicia szerokokątowe położone blisko pierwszych wstąpień. Inwersję wykonano dla dyskretnych częstotliwości od 4 do 16 Hz w krokach co ok. 1 Hz. Dolna częstotliwość została dobrana zgodnie z charakterystyką geofonów wykorzystanych w eksperymencie GRUNDY 2003 (częstotliwość własna 4.5 Hz). Analiza map częstotliwości pokazuje, że istotnie brak jest koherentnej energii poniżej 4 Hz. Zastosowana implementacja FWT jest więc połączeniem tzw. *early-arrival* FWT (Sheng i in. 2006) oraz *efficient* FWT (*sensu* Brenders i Pratt, 2007). W wyniku zastosowania metody FWT otrzymano wysokorozdzielczy model rozkładu prędkości fal P (V_p), który sam w sobie może stanowić materiał do interpretacji litofacjalnej. Różnice pola prędkości z modelu startowego (z tomografii pierwszych wstąpień) i modelu finalnego z FWT (tzw. *perturbation model*) są podobne do niskoczęstotliwościowej zmigrowanej sekcji

sejsmicznej, podkreślającej elementy strukturalne modelu. Duży nacisk w artykule położono na weryfikację wyników, pokazując zarówno dopasowanie danych, jak i porównanie z dostępnymi danymi geologicznymi (VSP z odwiertu, horyzonty sejsmiczne). Interpretacja strukturalna modelu FWT zgadza się z obrazem refleksyjności z sekcji po klasycznym przetwarzaniu CDP dla tego samego profilu. Wyznaczone granice zostały następnie zweryfikowane poprzez wykonanie trasowania promienia dla finalnego modelu FWT i porównania tak policzonych hodografów z kolekcjami strzałowymi. Było to szczególnie istotne dla granic wyznaczonych poniżej Cechsztynu. Wyznaczony spąg Permu i układ granic poniżej zdaje się potwierdzać wnioski pracy Malinowskiego i in. (2007a), dotyczącego istnienia w tym rejonie zapadliska karbońskiego. Praca ta pokazuje więc, jak interpretacja sejsmiczna może zostać wzbogacona, gdy dysponuje się wysokorozdzielczym modelem prędkościowym, szczególnie w sytuacji, gdy klasyczna sejsmika natrafia na problemy z obrazowaniem (obrazowanie poniżej horyzontu cechsztyńskiego).

Praca [5] stanowi kontynuację badań opublikowanych w pracy [7] i jest podsumowaniem moich długoletnich prac nad możliwością zastosowania tzw. wieloparametrowej metody FWT, a w szczególności możliwości wyznaczenia tłumienia fal sejsmicznych jako ważnego czynnika diagnostycznego dla składu mineralnego skał i ich nasycenia płynami złożowymi. Wstępne wyniki tych badań były prezentowane na konferencjach *European Association of Geoscientists and Engineers* (EAGE) w 2007 r. (Malinowski i in. 2007b), a także na specjalnym warsztacie EAGE poświęconym tłumieniu (Malinowski i in. 2009). Wyniki te zostały także przedstawione (Malinowski i in. 2011b) podczas dorocznego spotkania *Society of Exploration Geophysicists* (SEG) w ramach warsztatu o znamienym tytule *Full Waveform Inversion: Beyond the Phase of Direct Acoustic Arrivals*. Warto podkreślić, że wyniki opublikowane w omawianej pracy zostały dostrzeżone przez przedsiębiorców przemysłu naftowego – we wrześniu br. praca ta została nominowana do prestiżowej nagrody fundacji koncernu Eni 2013 w kategorii „*New Frontiers of Hydrocarbons (Upstream)*”.

Dotychczasowe próby zastosowania metody FWT do wyznaczenia tłumienia dotyczyły głównie danych typu cross-hole (Pratt i in., 2005), z nielicznymi tylko przykładami zastosowań do danych powierzchniowych (Hicks i Pratt, 2001; Smithyman i in., 2009). Mulder i Hak (2009) oraz Hak i Mulder (2010) zakwestionowali jednak możliwość łącznego wyznaczenia prędkości fal sejsmicznych i tłumienia, w przypadku, gdy dysponujemy tylko krótkimi offsetami. Ci sami autorzy (Hak i Mulder 2011), stwierdzili, że istnieje możliwość łącznej inwersji w celu odtworzenia prędkości i tłumienia za pomocą metody FWI, w przypadku gdy wykonamy dostatecznie dużą liczbę nieliniowych iteracji oraz gdy zastosujemy przyczynowy model tłumienia. W nawiązaniu do powyższych prac, przed przystąpieniem do inwersji danych rzeczywistych, należało zbadać możliwość zastosowania wieloparametrowej metody FWI w wariacie lepkoakustycznym (*visco-acoustic*) na gruncie teoretycznym i na danych syntetycznych. W przypadku rozważań teoretycznych zbadano tzw. *radiation pattern* (sekcja 3.1) dla prędkości fal podłużnych (V_p) oraz współczynnika dobroci dla fal podłużnych (Q_p). Wnioski z tej analizy były następujące: w przypadku gdy Q zbliża się do bardzo małych wartości, wrażliwość danych na tłumienie wzrasta relatywnie w stosunku do wrażliwości danych na zmiany

prędkości. Ponadto, wrażliwość danych na tłumienie zmniejsza się wraz z przejściem do niższych częstotliwości. Oznacza to, że wyznaczenie parametru Q dla niskich częstotliwości i dla ośrodka o niewielkim tłumieniu może być niestabilne. Potwierdzeniem tych wniosków są wyniki tzw. *grid-search analysis* (sekcja 3.2), dla prostego przypadku sferycznej inkluzji o ustalonych V_p i Q . Badając rozkład funkcji celu, dla różnych wartości V_p i Q , różnych od prawdziwych, można prześledzić wrażliwość łącznej inwersji na błędy poszczególnych parametrów. Dla parametru Q funkcja celu pokazuje dużo większą wrażliwość dla wartości Q mniejszych niż prawdziwa wartość niż dla Q wyższego niż prawdziwa wartość. Ilustruje to także potencjalną niestabilność połączonej inwersji V_p i Q , w ośrodku o niewielkim tłumieniu. W dalszej części artykułu (sekcja 3.3 i rozdział 4), pokazano możliwość wyznaczenia parametrów V_p i Q na danych syntetycznych, dla modeli o wzrastającym stopniu komplikacji. Szczególnie interesujące są wyniki testu dla realistycznej konfiguracji pomiarów, identycznej jak dla danych rzeczywistych z projektu GRUNDY 2003. Istotnie, zgodnie z przewidywaniami Haka i Muldera (2011), w przypadku inwersji wykonanej z dużą liczbą iteracji (40), możliwe jest łączne odtworzenie modelu V_p i Q . Ponadto, w testach syntetycznych zbadano wpływ warstwy przypowierzchniowej na wyniki inwersji. W modelu syntetycznym, bezpośrednio poniżej elewacji, umieszczono warstwę o 100-metrowej miąższości o niskich wartościach prędkości i dużym tłumieniu. Mimo iż model startowy zawierał ją *explicite*, inwersja w wariancie akustycznym (tzn. bez uwzględnienia tłumienia), spowodowała oszacowanie znacznie wyższych wartości prędkości w tej warstwie, a w modelu prędkości zaznaczyły się liczne artefakty. Dzięki inwersji lepkoakustycznej można było znakomicie zaobserwować odtworzenie rozkładu obu parametrów (V_p i Q), choć w modelu tłumienia nie udało się uzyskać tak ostrych granic, jak w modelu rzeczywistym.

Kolejnym krokiem było zastosowanie lepkoakustycznego wariantu FWT do danych z eksperymentu GRUNDY 2003. Przetwarzanie danych zostało wykonane podobnie do przedstawionego w omówionej pracy [7], z istotnym wyjątkiem, że dekonwolucja w domenie częstotliwości (wybielanie spektralne) została wykonana z normalizacją operatora, dzięki czemu zachowano prawdziwe amplitudy i ich zmiany z *offsetem* (AVO). W omawianej pracy przedstawiono zunifikowany proces zastosowania metody FWT do powierzchniowych, lądowych danych sejsmicznych, składający się z: (1) przetwarzania danych i wyznaczenia modelu startowego do inwersji; (2) właściwej inwersji; (3) oceny wiarygodności rozwiązania. Jednym z najistotniejszych wniosków wynikających z niniejszej pracy jest fakt, iż metoda FWT zastosowana do danych rzeczywistych, które cechuje duży wpływ tłumienia (silny efekt AVO), może dostarczyć wiarygodnego modelu prędkościowego również w wariancie czysto akustycznym, a efekt tłumienia jest usuwany poprzez normalizację amplitud. Jest to wniosek wynikający także z wcześniejszej aplikacji [7]. Przy spełnieniu innych warunków (odpowiednie zachowanie AVO oraz dane zawierające długie *offsety*) możliwe jest łączne odtworzenie V_p i Q . W pracy pokazano także, że ważnym elementem diagnostycznym dotyczącym wyników inwersji jest estymacja źródła wykonana *a posteriori*. Jest ona wrażliwa zarówno na błędy w modelu V_p , jak i Q . Estymacja źródła wykonana *a priori* dla modelu startowego pozwala z kolei wyznaczyć model startowy tłumienia, poprzez dopasowanie trendu AVO danych rzeczywistych i syntetycznych. Otrzymane wysokorozdzielcze modele V_p i Q

zostały zweryfikowane także poprzez porównanie danych rzeczywistych i sejsmogramów syntetycznych policzonych w domenie czasu. Uzyskano znakomite dopasowanie danych, co potwierdza jakość uzyskanych wyników.

Finalną część pracy stanowi interpretacja uzyskanych wyników. W połączeniu z danymi dotyczącymi stratygrafii, wykształcenia facjalnego, danymi z karotażu otworowego oraz wynikami badań laboratoryjnych, otrzymany model tłumienia został zinterpretowany w kontekście zmian litologicznych i ew. nasycenia płynami złożowymi. Obszary o anomalnie dużym tłumieniu fal zostały zinterpretowane jako obszary o dużej zawartości frakcji ilastej lub obszary nasycone solanką, co potwierdzają wyniki karotażu.

Podsumowując, należy stwierdzić, że praca otwiera nowe perspektywy w zakresie ilościowej i jakościowej interpretacji sejsmicznej i podkreśla zalety wynikające z zastosowania wieloparametrowej metody FWT do powierzchniowych danych sejsmicznych. W warunkach geologicznych Basenu Polskiego, gdzie tłumienie fal sejsmicznych odgrywa dużą rolę na jakość obrazowania sejsmicznego, niniejsza praca może przyczynić się do wprowadzenia do rutynowego przetwarzania metody odwrotnej filtracji Q, co pozwala zwiększyć rozdzielczość konwencjonalnych profiliowań refleksyjnych.

Praca [6] bazuje także na wynikach projektu GRUNDY 2003, a w szczególności na jego unikatowym schemacie akwizycji, podczas której dane rejestrowane były także w powtórzonych punktach wzdłuż profilu SUDETES 2003 S01 – na odległości 100-150 km. Dzięki gęstemu systemowi wzbudzania (30 punktów co ok. 1.5 km) zarejestrowane dane szerokokątowe zostały przetworzone z wykorzystaniem klasycznej metody CDP, co w przypadku danych z głębokich sondowań sejsmicznych jest procedurą wykorzystywaną sporadycznie. W pracy zademonstrowano, jak zastosowana metodyka przetwarzania danych szerokokątowych może wzbogacić możliwości interpretacji, gdy oprócz modelu prędkościowego, dysponuje się także obrazem refleksyjności. W przypadku typowych głębokich sondowań refrakcyjnych, ze względu na relatywnie duże odległości między punktami wzbudzania (30-50 km), stosowalność podobnej metodyki jest ograniczona.

W wyniku przetwarzania danych szerokokątowych (tzn. fal odbitych poza kątem krytycznym) uzyskano dobrej jakości sekcje sejsmiczne, ukazujące refleksyjność w dolnej skorupie i górnym płaszczu. Dodatkowo, dane z samego eksperymentu GRUNDY 2003, zostały poddane ponownemu przetwarzaniu, a specjalnie opracowana procedura przetwarzania danych o stosunkowo niskiej krotności pokrycia (maks. 30), pozwoliła na stworzenie sekcji refleksyjnej do 20 s. Finalnym etapem było wykonanie modelowania tomograficznego z wykorzystaniem fal odbitych od granicy Moho, w celu uzyskania morfologii powierzchni Moho w rejonie Monokliny Przedsudeckiej. Co ważne, w inwersji wykorzystano nie tylko fale odbite zakrytycznie (fale PmP) ale także tzw. odbicia pionowe, wyznaczone z nowo przetworzonej głębokiej sekcji refleksyjnej. Dzięki kombinacji różnych metod przetwarzania i modelowania sejsmicznego, tzn. przetwarzania CDP danych szeroko-kątowych, przetwarzania danych refleksyjnych oraz połączonej tomografii, uzyskano znacznie bogatszy obraz strukturalny skorupy ziemskiej w strefie brzeżnej Monokliny Przedsudeckiej i Uskoku Dolska. Oprócz części metodycznej, w pracy znajduje się także dyskusja wyników w kontekście interpretacji

geotektonicznej, w nawiązaniu do wcześniejszych prac z tego rejonu (głównie z eksperymentu POLONAISE'97). W szczególności przedyskutowano model, w którym dolna skorupa Baltiki została wciśnięta pod pryzmę akrecyjną Awalonii, a następnie przeszła proces transformacji do eklogitu. Istotnym wnioskiem interpretacyjnym, wynikającym z tej pracy, jest stwierdzenie, że najwyższa część płaszczu w tym rejonie może być zbudowana z eklogitu, w przeciwieństwie do wyników Grada i in., (2008), którzy interpretowali obecność dunitu w górnym płaszczu na obszarze przedsudeckim.

Zakończenie

Przedstawiony cykl siedmiu prac składających się na mój dorobek habilitacyjny związany jest z wypracowaniem metodyki przetwarzania, modelowania i interpretacji niekonwencjonalnych danych sejsmicznych. Są to dane o różnych skalach i rozdzielczości, pomierzone w trudnych warunkach geologicznych (np. *hardrock terrains*). Wspólne wyzwanie pozostaje wciąż to samo – jak najlepsze obrazowanie struktur geologicznych i poszerzenie naszej wiedzy, jak funkcjonuje geosystem. Warto podkreślić, że opracowane/współpracowane przeze mnie metody mają bezpośrednie zastosowanie do kolejnych przedsięwzięć badawczych, np. interpretacji głębokiego profilu refleksyjnego (por. pkt. 5), analizie materiału sejsmicznego z regionalnego projektu rozpoznania budowy geologicznej obszaru Polski (PolandSPAN), czy też modelowaniu danych z projektu dotyczącego genezy i struktury osuwisk typu *quick-clay* w Szwecji (por. pkt. 5). Taka różnorodność zainteresowań – od struktur bardzo płytkich do struktur głębokich – może dziwić, jednak moim mottem jest poszukiwanie problemów badawczych w obrazowaniu sejsmicznym, niezależnie od skali tego obrazowania. Wyrazem tych poszukiwań jest m.in. utworzenie w maju 2012 r. własnego zespołu badawczego w macierzystym Instytucie o nazwie „Zespół Obrazowania Sejsmicznego”.

Literatura

- Bleibinhaus, F. et al., 2007. Structure of the California Coast Ranges and San Andreas Fault at SAFOD from seismic waveform inversion and reflection imaging. *Journal of Geophysical Research*, 112(B06315).
- Brenders, A. J. & Pratt, R. G., 2007. Efficient waveform tomography for lithospheric imaging: implications for realistic, two-dimensional acquisition geometries and low-frequency data. *Geophysical Journal International*, 168(1), pp.152–170.
- Grad, M. et al., 2003. SUDETES 2003 Seismic Experiment. *Stud. Geophys. Geod.*, 47, pp.681–689.
- Grad, M. et al., 2008. Lithospheric structure of the Bohemian Massif and adjacent Variscan belt in central Europe based on profile S01 from the SUDETES 2003 experiment. *Journal of Geophysical Research*, 113(B10).
- Hak, B. & Mulder, W.A., 2010. Migration for velocity and attenuation perturbations. *Geophysical prospecting*, 58, pp.939–951.
- Hak, B. & Mulder, W.A., 2011. Seismic attenuation imaging with causality. *Geophysical Journal International*, 184(1), pp.439–451.
- Hicks, G.J. & Pratt, R G, 2001. Reflection waveform inversion using local descent methods: estimating attenuation and velocity over a gas-sand deposit. *Geophysics*, 66(2), pp.598–612.

- Malinowski, M., D. White, E. Schetselaar, 2012, Seismic Methods in Mineral Exploration - A Case Study from Flin Flon Mining Camp, Canada, 74th EAGE Conference & Exhibition, Kopenhaga (poszerzone streszczenie).
- Malinowski, M., S. Operto, and A. Ribodetti, 2011b, On the Footprint of Attenuation on Full-waveform Inversion of Land Data: A Case Study from the Polish Basin, SEG Annual Meeting, Workshop W-5: Full Waveform Inversion: Beyond the Phase of Direct Acoustic Arrivals, San Antonio.
- Malinowski, M., S. Operto, and A. Ribodetti, 2011a, On the Footprint of Attenuation on Full-waveform Inversion of Land Data: A Case Study from the Polish Basin, 73rd EAGE Conference, Wiedeń (poszerzone streszczenie).
- Malinowski, M., D. White & E. Schetselaar, 2010, 3-D Seismic Modelling of the Flin Flon VMS Mining Camp, 72nd EAGE Conference&Exhibition, Barcelona (poszerzone streszczenie).
- Malinowski, M., A. Ribodetti and S. Operto, 2009, Estimating in situ rock properties by multiparameter full waveform inversion: a case study, SEG & EAGE Research Workshop, Barcelona (poszerzone streszczenie).
- Malinowski M. and D. White, 2009, Converted-wave Imaging in the Flin Flon Mining Camp, Canada, 71st EAGE Conference & Exhibition, Amsterdam (poszerzone streszczenie).
- Malinowski, M.; White, D. J.; Mwenifumbo, C. J.; Salisbury, M.; Bellefleur, G.; Schmitt, D.; Dietiker, B.; Schetselaar, E.; Duxbury, A., 2008, Seismic Exploration for VMS Deposits within the Paleoproterozoic Flin Flon Belt, Trans-Hudson Orogen, Canada, 70th EAGE Conference & Exhibition, Rome (poszerzone streszczenie).
- Malinowski, M., A. Ribodetti and S. Operto, 2007b, Multiparameter full-waveform inversion for velocity and attenuation: refining the imaging of a sedimentary basin, 69th EAGE Conference and Exhibition, London (poszerzone streszczenie).
- Malinowski, M. et al., 2007a. Effective sub-Zechstein salt imaging using low-frequency seismics — Results of the GRUNDY 2003 experiment across the Variscan front in the Polish Basin. *Tectonophysics*, 439(1-4), pp.89–106.
- Malinowski M. and S. Operto, 2006, Benefits of Full-Waveform Modelling and Inversion. A Case Study from the Polish Basin, 68th EAGE Conference and Exhibition, Wiedeń (poszerzone streszczenie).
- Mulder, W.A. & Hak, B., 2009. An ambiguity in attenuation scattering imaging. *Geophysical Journal International*, 178(3), pp.1614–1624.
- Operto, S. et al., 2006. Crustal imaging from multifold ocean bottom seismometers data by frequency-domain full-waveform tomography: application to the eastern Nankai trough. *Journal of Geophysical Research*, 111(B09306).
- Pratt, R. G. et al., 2005. Waveform tomography images of velocity and inelastic attenuation from the Mallik 2002 crosshole seismic surveys. In S. R. Dallimore & T. S. Collett, eds. *Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada*. Geological survey of Canada.
- Ravaut, C. et al., 2004. Multi-scale imaging of complex structures from multi-fold wide-aperture seismic data by frequency-domain full-wavefield inversions: application to a thrust belt. *Geophysical Journal International*, 159(3), pp.1032–1056.
- Den Rooijen, H.P.G.M., 1991. Stacking of P-SV seismic reflection data using dip moveout. *Geophysical Prospecting*, 39, pp.585–598.

- Schetselaar, E., S. Pehrsson, C. Devine, B. Lafrance, D. White and M. Malinowski, 2012, 3D Geologic Modelling in the Flin Flon Mining Camp, Trans-Hudson Orogen, Canada: Evidence for Polyphase Imbrication of the Flin Flon - 777- Callinan VMS Ore System, *Economic Geology* (accepted).
- Schetselaar, E.; Pehrsson, S.; Devine, C.; Currie, M.; White, D.; Malinowski, M., 2010, The Flin Flon 3D Knowledge Cube; Geological Survey of Canada, Open File 6313, 35 pp.
- Sheng, J. et al., 2006. Early arrival waveform tomography on near-surface refraction data. *Geophysics*, 71(4), pp.U47–U57.
- Sirgue, L. et al., 2010. Full waveform inversion: the next leap forward in imaging at Valhall. *First Break*, 28, pp.65–70.
- Smithyman, B. et al., 2009. Detecting near-surface objects with seismic waveform tomography. *Geophysics*, 74(6), pp.WCC119–WCC127.
- Snyder, D.B., Cary, P. & Salisbury, M., 2009. 2D-3C high-resolution seismic data from the Abitibi Greenstone Belt, Canada. *Tectonophysics*, 472(1-4), pp.226–237.
- Tarantola, A., 1984. Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation. *Geophysics*, 49(8), pp.1259–1266.
- Virieux, J. & Operto, S., 2009. An overview of full waveform inversion in exploration geophysics. *Geophysics*, 74(6), pp.WCC127–WCC152.
- White, D., M. Malinowski, C. Devine, K. Gilmore, E. Schetselaar and S. Pehrsson, 2012, Drill targeting with 3D seismics for VMS exploration in the Flin Flon Mining Camp, *Economic Geology* (accepted).
- White, D. and M. Malinowski, 2011, 3D Migration of 2D Crooked-line Seismic Profiles, 73rd EAGE Conference, Wiedeń (poszerzone streszczenie).
- White, D., M. Malinowski, P. Cary, D. Secord, 2008, 2D/3D multicomponent seismic imaging in the Flin Flon Mining Camp, SEG Annual Meeting, Las Vegas (poszerzone streszczenie).
- Wild, A.J., Hobbs, R.W. & Frenje, L., 2000. Modelling complex media: an introduction to the phase-screen method. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 120(3), pp.219–225.
- Śliwiński, Z. et al., 2006. Interpretacja zasięgu eksternidów warwencyjskich na eksperymentalnym profilu sejsmicznym GRUNDY 2003. *Przegl. Geol.*, 54, pp.45–50.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych (artystycznych).

Interpretacja danych z dużych projektów badań refrakcyjnych i szerokokątowych refleksyjnych

Brałem udział w pracach polowych i interpretacji największego do tej pory zrealizowanego na świecie projektu sejsmicznych badań refrakcyjnych – CELEBRATION 2000, wykonanego przy współudziale ponad 20 instytucji naukowych z Europy, USA i Kanady, który objął zasięgiem duży obszar Europy Centralnej. W wyniku własnych badań i udziału w zespołach badawczych, pracujących z danymi z projektu CELEBRATION 2000, skonstruowałem i zinterpretowałem dwu- i trójwymiarowe modele

budowy skorupy ziemskiej w niezwykle interesujących z punktu widzenia geodynamiki obszarach: przejścia od Platformy Prekambryjskiej do struktur paleozoicznych zachodniej Europy (Malinowski i in. 2005) oraz w Basenie Panońskim (praca w przygotowaniu). Należy podkreślić, że praca Malinowski i in. (2005) została uznana jako jedna z 50 najczęściej cytowanych prac czasopisma *Tectonophysics* w okresie 2005-2010.

Analizowałem także pole falowe zarejestrowane podczas głębokich sondowań refrakcyjnych pod kątem wykorzystania go do stworzenia płytkich modeli rozkładu prędkości fal poprzecznych nad podstawie inwersji krzywych dyspersji fal powierzchniowych (Malinowski 2005).

Stworzenie dużego modelu trójwymiarowego (500 x 500 km) budowy skorupy ziemskiej na obszarze południowej Polski było częścią mojej pracy doktorskiej (Malinowski 2006). Tematyka ta została następnie rozwinięta w dwóch publikacjach w czasopiśmie *Geophysical Journal International* (Malinowski i in. 2008;2009). Jestem także współautorem, jako członek tzw. grup roboczych projektów CELEBRATION 2000 oraz SUDETES 2003, kilku publikacji w czasopismach z listy JCR, w tym jednej monografii w prestiżowym tomie wydanym przez *Geological Society of America* (Grad i in. 2007). Poniższe publikacje, których jestem pierwszym autorem, związane były z omawianymi badaniami:

Artykuły:

M. Malinowski, Środa, P., Grad, M., Guterch, A. and CELEBRATION 2000 Working Group, 2009, Testing robust inversion strategies for three-dimensional Moho topography based on CELEBRATION 2000 data, *Geophys. J. Int.* 179, 1093–1104, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04323.x

M. Malinowski, M. Grad, A. Guterch and CELEBRATION 2000 Working Group, 2008, Three-dimensional seismic modelling of the crustal structure between East European Craton and the Carpathian Mts. in SE Poland based on CELEBRATION 2000 data, *Geophys. J. Int.*, 173, 546-565.

M. Malinowski, A. Żelaźniewicz, M. Grad, A. Guterch, T. Janik and CELEBRATION Working Group, 2005, Seismic and geological structure of the crust in the transition from Baltica to Palaeozoic Europe in SE Poland - CELEBRATION 2000 experiment, profile CEL 02, *Tectonophysics* 401(1-2), 55-77.

M. Malinowski, 2005, Analysis of short-period Rayleigh waves recorded in the Bohemian Massif area during CELEBRATION 2000 experiment, *Studia Geophys. Geodet.* 49, 485-500.

Zaproszone wystąpienia konferencyjne:

M. Malinowski and CELEBRATION 2000 Working Group, 2004, 3D seismic modeling of crustal structure between East European Craton and the Carpathians Mts. in the SE Poland based on CELEBRATION 2000 data (**invited**), 1st General Assembly of European Geosciences Union, Nice, France.

Oprócz ww. artykułów, jako członek tzw. CELEBRATION 2000 Working Group, byłem współautorem dalszych 7 publikacji w renomowanych czasopismach (*Tectonophysics*, *Geophys. J. Int.*) oraz rozdziału w monografii (American Geological Society Memoir). Wyniki badań przedstawiłem w formie 17 wystąpień na konferencjach i warsztatach międzynarodowych.

Interpretacja niskoczęstotliwościowej sejsmiki w Basenie Polskim z zastosowaniem innowacyjnych metod

Byłem głównym wykonawcą modelowania i interpretacji danych z eksperymentu sejsmicznego GRUNDY 2003, zrealizowanego na zamówienie PGNiG SA. Był to unikatowy eksperyment o skali pośredniej między badaniami skorupowymi a sejsmiką poszukiwawczą. Dzięki temu dał on możliwość przetestowania różnych metod modelowania i interpretacji: przetwarzania refleksyjnego, tomografii bazującej na falach załamanych oraz głębokościowej migracji przed składaniem. Wstępne opracowanie metodyki interpretacji tego typu danych stanowiło drugą część mojej rozprawy doktorskiej. Niniejsze publikacje powstały w oparciu o dane z tego eksperymentu (oprócz wymienionych wyżej prac [5]-[7]):

Artykuły:

M. Malinowski, M. Grad, A. Guterch, E. Takacs, Z. Śliwiński, L. Antonowicz, E. Iwanowska, G. R. Keller, E. Hegedus, 2007, Effective sub-Zechstein salt imaging using low-frequency seismics - results of the GRUNDY 2003 experiment across the Variscan front in the Polish Basin, *Tectonophysics*, 439, 89-106.

Śliwiński, Z.; Antonowicz, L.; Iwanowska, E.; **Malinowski, M.**; Grad, M.; Guterch, A.; Keller, R.G.; Takács, E. & Working Group, 2006, Interpretacja zasięgu eksternidów waryscyjskich na eksperymentalnym profilu sejsmicznym GRUNDY 2003, *Przegląd Geolog.*, 1/2006, 45-51.

Poszerzone streszczenia:

M. Malinowski, 2005, Velocity macro-model estimation by wavefield continuation. Application to GRUNDY 2003 data. 67th EAGE Conference & Exhibition, Madrid.

Wyniki badań przedstawiłem w formie 10 wystąpień na konferencjach i warsztatach międzynarodowych (m.in. konferencje AGU, EGU, EAGE).

Przetwarzanie i interpretacja danych głębokiej sejsmiki refleksyjnej

Warto podkreślić, że metody wypracowane przeze mnie w ramach cyklu prac habilitacyjnych, znajdują także swoje zastosowanie w przetwarzaniu i interpretacji danych sejsmicznych innego rodzaju, np. głębokiego profilu refleksyjnego z pld.-wsch. Polski. Profil ten, o długości 240 km (profil POLCRUST), jest bezprecedensowym przedsięwzięciem badawczym w kraju, a jednym z nielicznych tego typu na świecie. Został on zrealizowany w ramach projektu zamawianego przez Ministerstwo Środowiska przy udziale PGNiG i wykonywanego przez Konsorcjum Naukowo-Przemysłowe kierowane przez Instytut Geofizyki PAN. Byłem jednym z kluczowych wykonawców tego

projektu. Osobiście sprawowałem nadzór merytoryczny nad przetwarzaniem i interpretacją danych refleksyjnych w zakresie głębokiej skorupy i płaszcza, jak również przetwarzaniem i modelowaniem danych refrakcyjnych. Koordynowałem także merytorycznie zakres prac po stronie zespołu z Instytutu oraz byłem odpowiedzialnym za przygotowanie opracowania końcowego. Aktualnie trwają prace nad przygotowaniem publikacji z wynikami projektu w prestiżowych czasopismach (m.in., *Geophysical Research Letters*, *Geology*, *Tectonics*).

Monitorowanie osuwisk typu quick-clay na podstawie zintegrowanych metod geofizycznych

Od września 2011 r. biorę udział (wspólnie z doktorantką) w projekcie koordynowanym przez Uniwersytet w Uppsali, pt. „*Integration of geophysical, hydrogeological and geotechnical methods to aid monitoring landslide in Nordic countries: A 4D approach for landslide risk assessment*”. Jest to projekt finansowany przez *Society of Exploration Geophysics* w ramach programu *Geoscientist without Borders*. W ramach projektu pomierzono bogaty zestaw danych geofizycznych, w tym płytkie profile 2D i zdjęcie sejsmiczne 3D. Jest to doskonała okazja do przetestowania zaawansowanych metod przetwarzania oraz inwersji danych sejsmicznych, np. inwersji pełnego pola falowego oraz ich weryfikacji przez porównanie z innymi metodami. Wstępne wyniki zastosowania metody FWT są bardzo obiecujące. Zostały przedstawione na trzech konferencjach, spotykając się z dużym zainteresowaniem. Poniżej przedstawiony jest wybór publikacji związanych z projektem:

Artykuły:

A. Adamczyk, **M. Malinowski** i A. Malehmir, 2012, Application of first-arrival tomography to characterize a quick-clay landslide site in southwest Sweden, *Acta Geophysica* (po recenzjach, niewielkie zmiany).

Poszerzone streszczenia:

A. Adamczyk, **M. Malinowski** i A. Malehmir, 2012, Near-surface high-resolution velocity model building using full-waveform inversion: a case study from a quick-clay landslide site in southwest Sweden, SEG Research Workshop – Velocity Model Building in Complex Geology, Charleston (poszerzone streszczenie).

A. Adamczyk, **M. Malinowski** i A. Malehmir, 2012, Application of Full-waveform Inversion to Characterize Quick-clay Landslide Site in Southwest Sweden, 74th EAGE Conference & Exhibition, Kopenhaga (poszerzone streszczenie).



