

Prof. dr hab. inż. Kaja Pietsch
Katedra Geofizyk
Wydział Geologii Geofizyki i Ochrony Środowiska
Akademia Górniczo-Hutnicza

Kraków, 30.08.2016

**Recenzja rozprawy doktorskiej
Pana mgr Marcina Polkowskiego
„Lokalizacja ognisk trzęsień Ziemi metodą propagacji wstecznej z wykorzystaniem
implementacji metody *fast marching* w modelu 3D obszaru Polski”**

Praca została wykonana w Instytucie Geofizyki, Wydział Fizyki, Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem Pana prof. dr hab. Marka Grada. Opinię opracowano na podstawie zlecenia Dziekana Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, Pani prof. dr hab. Teresy Rząca-Urban.

Na początku rozprawy Autor pisze „Sejsmologia jest nauką zajmującą się rejestracją, opisem i interpretacją fal sprężystych propagujących we wnętrzu Ziemi. Podstawowym parametrem poddawany interpretacji jest czas przyścia fali od źródła do rejestratora. O ile samo zarejestrowanie czasu przyścia fali jest współcześnie czynnością rutynową, o tyle obliczenie czasu przyścia fali i znalezienie jej toru od źródła do odbiornika nie jest już takie proste”. Drugi cytat „Rozwiązanie tych zadań wymaga dużej ilości dobrych rejestracji sejsmicznych, dokładnej wiedzy na temat prędkości fal sejsmicznych w ośrodku, oraz algorytmu, który przeliczy mierzone na stacjach czasy wejścia fal na czas w źródle i lokalizację badanego zjawiska”.

W recenzowanej rozprawie doktorskiej Pan magister Marcin Polkowski w kolejnych częściach pracy analizuje i wg mnie z sukcesem realizuje trzy wyżej wymienione zadania.

Kolejne części to:

1. Trójwymiarowy model sejsmiczny skorupy i górnego płaszcza Ziemi obszaru Polski,
2. Pasywny eksperyment sejsmiczny „13 BB star” na krawędzi platformy wschodnioeuropejskiej (zrealizowano w ramach grantu Narodowego Centrum Nauki (DEC-2011/02/A/ST10/00284), którego beneficjentem był prof. dr hab. Marek Grad),
3. Lokalizacja zjawisk sejsmicznych metodą propagacji wstecznej z wykorzystaniem metody *fast marching*.

Uzupełnieniem tekstu pracy (136 stron) są:

Dodatki - A. Kod źródłowy Watch Dog; B. Elementy interfejsu www „13 BB star”; C. Kod źródłowy *Fast Marching* oraz Bibliografia - 130 pozycji.

I. Trójwymiarowy model sejsmiczny skorupy i górnego płaszcza Ziemi obszaru Polski

Skomplikowana struktura tektoniczna obszaru Polski spowodowała konieczność wydzielenia 14 odrębnych obszarów geologicznych (11 obszarów nizinnych oraz 3 obszary w Karpatach), w obrębie których wydzielono dla serii osadowej warstwy: trzeciorzęd i czwartorzęd, kreda, jura, trias, perm oraz osady podpermskie. Podział opracowano na bazie szeroko i trafnie cytowanej literatury geologiczno-geofizycznej.

Do konstrukcji trójwymiarowego modelu prędkościowego Polski obejmującego serię osadową wykorzystane zostały pomiary pionowych profilowań sejsmicznych (VSP) w odwiertach (1188 odwiertów). Dla głębokości, których nie obejmowały odwierty

zaproponował Autor wykorzystanie odpowiednio przeliczanej średniej krzywej dla Polski. Powyższe dane posłużyły do wyznaczenia zależności prędkość-głębokość dla jednostek geologicznych oraz dla okresów geologicznych [publikacja Grad i in., 2016; *Tectonophysics*]. Zależności te zobrazowano na wykresach zawierających prędkości warstwowe i interwałowe z VSP, prędkości średnie dopasowane wielomianami oraz relację prędkość-głębokość wyznaczoną dla wszystkich osadów w Polsce (rysunki: I.3.3., I.3.4., I.3.5., I.3.6, I.3.7., I.3.8., I.3.9.). Wyznaczone dla pokrywy osadowej zależności pokazują wyraźny wzrost prędkości z głębokością, od ok. 1800m/s dla osadów trzecio- i czwartorzędowych do ok. 5000m/s dla osadów permskich i dewońskich (Rozdziały: 3.1, 3.2.).

Do wyznaczenia relacji prędkości-głębokości dla utworów starszego paleozoiku oraz w strefie TESZ i Karpatach, gdzie miąższości serii osadowej dochodzą odpowiednio do ok. 16 i 25km, dodatkowo wykorzystane zostały dane z profili refrakcyjnych (29 profili). Na ich podstawie skonstruowano jednowymiarowe, pionowe profile prędkości, odczytywane bezpośrednio z dwuwymiarowego modelu refrakcyjnego – tzw. odwierty wirtualne (741 odwiertów). Zostały one przetworzone w identyczny sposób jak przy konstrukcji modeli z VSP oraz przypisane do wydzielonych jednostek geologicznych (rysunki: I.3.13., I.3.14., I.3.15.). W jednostkach poza Karpackich prędkości w osadach starszego paleozoiku rosną powoli z głębokością do ok. 5500-6000m/s na głębokości ok. 8-11km. Natomiast w Karpatach prędkość szybko wzrasta od ok. 2000m/s do 4500m/s na głębokości 1km, głębiej rośnie wolniej, a dla głębokości 15km jest praktycznie stała (6000m/s). Uzyskane wyniki zostały częściowo opublikowane w *Acta Geophysica* [Polkowski i Grad, 2015] (Rozdział 3.3.).

Do wyznaczenia finalnej mapy głębokości skonsolidowanego podłoża, w sytuacji zasadniczych zmian miąższości skorupy osadowej na terenie Polski oraz kontrowersji na ten temat pomiędzy geologami (szeroko cytowana literatura), wykorzystane zostały:

1. Opracowane wcześniej mapy - mapa Skorupy [1974] dla północno-wschodniej Polski oraz mapa opracowana do głębokości 6km [Małolepszy, 2005]. Mapy te skonstruowano na podstawie danych z odwiertów i danych sejsmicznych z regionalnych profili refrakcyjnych. Wykorzystano również mapę dla obszaru Karpat opracowaną na podstawie badań magneto-tellurycznych [Stefaniuk i Klityński, 2007]. Powyższe mapy nie dostarczają jednak żadnych informacji o głębokościach zalegania podłoża w strefie TESZ (rysunek I.3.17.).

2. Opracowana, w ramach doktoratu, mapa podłoża, która skonstruowana została na bazie 32 sejsmicznych profili refrakcyjnych uzyskanych w ramach głównych kampanii pomiarowych (m.in. POLONAISE'97, CELEBRATION 2000, SUDETES 2003 i in.). Dla każdego profilu analizowano numeryczny model prędkościowy 2D komórki o wymiarach 1000m w poziomie/100m w pionie, uzyskując dla każdej komórki lokalizację geograficzną, głębokość podłoża i prędkość w skorupie bezpośrednio pod podłożem.

Ostateczną mapę głębokości podłoża uzyskano poprzez uśrednienie 4 map źródłowych. Pokazuje ona wyraźny wzrost głębokości w strefie TESZ oraz w Karpatach (rysunek I.3.18.a.). Mapa ta została już opublikowana w *International Journal of Earth Sciences* [Grad i Polkowski, 2016].

Bazując na analizowanych danych sejsmicznych skonstruowana została również mapa prędkości fali P podłoża, która wzrasta od 5.2km/s do 6.8km/s dla Polski północno-wschodniej (I.3.18.b.).

Wszystkie mapy zostały przeliczone do wspólnego formatu geograficznego (wymiar komórki odpowiada fizycznemu rozmiarowi 1112-1281m – dla północnej i 1112-1459m dla południowej Polski) (Rozdział 3.4.).

Mapy spągu górnej, środkowej i dolnej skorupy opracowane zostały na bazie danych sejsmicznych, w sposób analogiczny jak mapa podłoża. Dodatkowo utworzone zostały również jednowymiarowe pionowe profile prędkości – odwierty wirtualne – obejmujące warstwy skorupy i płaszcz (rysunek: I.3.20.). (Rozdział 3.5.).

Skonstruowany model 3D zdefiniowany został jako prostopadłościan we współrzędnych sferycznych. Całkowita ilość komórek modelu wynosi 2 117 570 376. Komórki mają w przybliżeniu wymiary poziome ok. 1,5/1,5km oraz miąższość = 10m.

Budowa modelu przebiegała w dwóch etapach. W pierwszym wczytywany został model geologiczny zawierający geometrię 12 warstw (od mapy topograficznej po mapę powierzchni Moho). W drugim zaś krzywe zależności prędkości od głębokości, które zostały wyznaczone dla zdefiniowanych warstw i jednostek geologicznych. (Rozdział 4.1.).

Skonstruowany model 3D omówiony został na bazie przedstawionych w pracy kolejnych zestawów, które zawierają: mapy miąższości oraz odpowiadające im mapy średnich prędkości. Dzięki temu możliwa jest ocena parametrów poszczególnych warstw: grubość i średnia prędkość oraz pionowe i poziome niejednorodności. W obrębie serii osadowej analizowane są kolejno mapy dla warstw: trzecio i czwartorzędu, kredy, jury, triasu, permu, starszego paleozoiku i fliszu karpackiego, a w obrębie skorupy: dla skorupy górnej, środkowej i dolnej (rysunki: I.4.1., I.4.2., I.4.3., I.4.4.). Dodatkowo przedstawiono mapy zbiorcze dla serii osadowej, skorupy krystalicznej oraz dla całej skorupy (I.4.5., I.4.6.). Wyniki zostały częściowo opublikowane w *Tectonophysics* [Grad i in., 2016]. Każdy z zestawów jest w pracy szczegółowo omówiony w powiązaniu z geologiczno-tektoniczną interpretacją obserwowanych pól. Przykładem może być interpretacja map dla trzech warstw skorupy krystalicznej, w oparciu o które w sposób jednoznaczny wyznaczono przebieg strefy TTZ. (Rozdział 4.2.)

Model 3D pozwala także, co pokazuje Autor, na konstrukcję przekroi pionowych oraz cięć poziomych, które można wykorzystać do szczegółowej analizy przebiegu np. konkretnej warstwy (rysunki: I.4.7., I.4.8.).

Omówiony powyżej cyfrowy model 3D struktury i prędkości sejsmicznych Polski został skonstruowany z wykorzystaniem autorskich programów komputerowych doktoranta.

Model 3D, co podkreśla Autor, może być wykorzystywany do badania sejsmiczności lokalnej. Do tej pory do tych zagadnień wykorzystywano modele 1D, co przy dużym zróżnicowaniu budowy geologicznej Polski, często skutkowało dużymi niedokładnościami. Obrazują to wykonane przez Doktoranta zestawienia czasów przejścia przez warstwę osadową obliczone w oparciu o opracowany model 3D oraz model 1D (*iasp'91*) (rysunek: I.5.1.). Innym przykładem może być wykonane przez Autora porównanie mapy Moho obliczonej z wykorzystaniem skonstruowanego modelu 3D z wcześniejszymi mapami. Różnice w głębokościach Moho wynoszą od +/- 4km do 10-20km (rysunek: I.5.2.). (Rozdział 5.)

Autor, jako wadę modelu 3D w stosunku do modelu 1D podaje złożoność wszystkich symulacji, w tym obliczeń czasów przejścia od źródła do odbiornika. Rozwiązanie tego problemu widzi Doktorant w opracowaniu metody szybkiego obliczania czasów przejścia przez model 3D. Zaimplementował do tego celu metodę *fast marching* – co zostało przedstawione w części III.

Część pierwszą rozprawy, którą szczegółowo omówiłam powyżej, oceniam bardzo wysoko. Użyte metody wyznaczania relacji prędkość-głębokość oraz ilość wykonanych analiz umożliwiły stworzenie wiarygodnego modelu rozkładu prędkości, z podziałem na rejony geologiczne Polski, jak i kolejne warstwy skorupy. Skonstruowanie tak szczegółowego modelu sejsmicznego 3D było możliwe dzięki ogromnej ilości danych otworowych i sejsmiki refrakcyjnej, które po przetworzeniu umożliwiły określenie parametrów bardzo precyzyjnie przemyślanego i zrealizowanego przez Doktoranta komputerowego modelu symulacyjnego struktury wglębnej obszaru Polski, od powierzchni topograficznej do głębokości 60km.

Nowy, cyfrowy model wysokiej rozdzielczości otwiera perspektywę zarówno nowych badań (o czym wspomina Autor w Podsumowaniu części I), ale także może być wg mnie

z sukcesem wykorzystany do reinterpretacji starych profili refrakcyjnych i stworzenia bardziej jednoznacznych map podstawowych powierzchni granicznych. Może to doprowadzić do opracowania bardziej wiarygodnego modelu budowy tektonicznej Polski.

Podsumowując tą część można stwierdzić, że jedno z zadań wypunktowanych przez Doktoranta we wstępie uzyskania „dokładnej wiedzy na temat prędkości fal sejsmicznych w ośrodku” zostało spełnione.

II. Pasywny eksperyment sejsmiczny „13 BB star” na krawędzi platformy wschodnioeuropejskiej

Druga część rozprawy zawiera opis budowy i działania stacji zbudowanej w ramach grantu „Pasywny eksperyment sejsmiczny 13 BB star”, sfinansowanego przez NCN ((DEC-2011/02/A/ST10/00284), którego beneficjentem był prof. dr hab. Marek Grad. Stacja została zlokalizowana na brzegu platformy wschodnioeuropejskiej, w kompleksach leśnych, w dużych odległościach od obiektów generujących szum mechaniczny.

Każda z 13 stacji sejsmicznych zawiera identyczne układy rejestrujące, zasilające oraz transmisji danych, działające w sposób ciągły pomimo braku stałego połączenia internetowego i stałego źródła zasilania. Projektantem i w większości wykonawcą stacji oraz oprogramowania, niezbędnego do jej ciągłej, zdalnej obsługi był Doktorant. (Rozdział 7.1)

Skonstruowany system, oprócz zadań merytorycznych, realizuje również niezbędne zadania związane z jego funkcjonalnością. Zaliczam do nich: zapewnienie zasilania dla urządzeń stacji (ogniwa fotowoltaiczne, akumulatory, konwertery napięcia); uodpornienie systemu na braki zasięgu sieci komórkowej (moduł *WatchDog* i oprogramowanie sterujące); zabezpieczenie transmisji danych protokołem *SSH*; zabezpieczenie systemu przed ingerencją zewnętrzną (brak adresu IP); organizacja dostępu do komputera stacji dla osób upoważnionych poprzez system komunikacji z serwerem (*tunel SSH*). (Rozdział 7.2)

Dodatkowo, z punktu widzenia funkcjonalności oprogramowania serwera w zakresie dostępu do danych zarejestrowanych na stacjach, utworzono program dostępowy działający na serwerze, którego funkcjonalność nie ogranicza się tylko do przeglądania danych, ale pozwala też analizować te dane, wykorzystując wiele różnych „widoków”. (Rozdział 7.3)

Wyniki eksperymenty „13 BB star” w postaci rejestracji ciągłych, bez szumów i o wysokiej rozdzielczości wykorzystał Doktorant w III części rozprawy do testowania zaproponowanych przez siebie metod lokalizacji zjawisk sejsmicznych. (Rozdział 8)

Zaprojektowanie, konstrukcja oraz oprogramowanie stacji „13 BB star” dobitnie świadczy o umiejętności Doktoranta w zakresie twórczego korzystania z technologii informatycznych.

III. Lokalizacja zjawisk sejsmicznych metodą propagacji wstecznej z wykorzystaniem metody *fast marching*

Niezbędnym warunkiem do lokalizacji źródła zjawisk sejsmicznych w oparciu o czasy zarejestrowane na stacjach jest znajomość modelu prędkości ośrodka, przez który propaguje fala oraz metody obliczania teoretycznego czasu przyścia (zadanie ze wstępu rozprawy doktorskiej).

Doktorant, dysponując opracowanym już modelem prędkości 3D, wybrał metodę obliczania czoła falowego w wersji *fast marching*, metodę o dużej wydajności, dla której opracował algorytm i kod źródłowy modułu obliczeniowego. (Rozdziały 11.1 i 11.2).

Metoda umożliwia obliczenie czasu przyścia fali do wybranej komórki modelu na podstawie czasów w komórkach przyległych. Wynikiem jest model 3D czasów przyścia fali sejsmicznej od stacji sejsmicznej do każdej komórki modelu, po drodze spełniającej zasadę Fermata i prawo Snelliusa. Dzięki temu, co podkreśla Autor, obliczenia dla danej stacji należy

wykonać tylko raz i zapisać wynik w pamięci komputera (ok. 8 GB). (Rozdziały 11.3 i 11.3.1).

Do wyznaczenia lokalizacji ogniska zjawiska sejsmicznego w oparciu o zarejestrowane na stacjach czasy pierwszych wstąpień proponuje Doktorant zastosowanie metody „propagacji wstecznego frontu falowego”. Polega ona na wykorzystaniu symulacji metodą *fast marching* do wyznaczenia położenia frontów falowych rozchodzących się od każdej stacji, dla czasów coraz mniejszych od zarejestrowanych na tych stacjach czasów pierwszych wstąpień. W okolicy rzeczywistego czasu wystąpienia zjawiska powinna być obserwowana maksymalna koincydencja obliczonych, dla różnych stacji, frontów falowych. Do lokalizacji epicentrum trzęsienia oraz głębokości ogniska proponuje Autor określenie przestrzennego rozkładu koincydencji dla wyznaczonego czasu zjawiska. Ze względu na rozmiar modelu Doktorant proponuje także badanie koincydencji w ograniczonej ilości cięć poziomych, w przedziale spodziewanej głębokości trzęsienia ziemi. (Rozdział 12).

Dla zobrazowania działania zaproponowanej metody pokazano w doktoracie przykłady interpretacji trzech zjawisk: trzęsienia ziemi w Polkowicach, kontrolowanej eksplozji min w Zatoce Gdańskiej (rejestracje prowadziły stacje sejsmiczne eksperymentu „13 BB star” jak i polskie stacje permanentne) oraz trzęsienia ziemi w Jarocinie, do analizy którego wykorzystano rejestracje zebrane w ramach eksperymentu PASSEQ 2006-2008. Dla każdego z tych zjawisk omawiane są szczegółowo kolejne kroki postępowania: wyznaczenie czasu zjawiska, przestrzennej lokalizacja źródła oraz głębokości jego położenia. Skuteczność metody jednoznacznie potwierdza zgodność wyznaczonych parametrów zjawiska ze znanym rzeczywistym czasem i miejscem eksplozji min w Zatoce Gdańskiej. (Rozdział 13).

Zaproponowana przez Doktoranta metoda "propagacji wstecznego frontu falowego", do realizacji której wykorzystuje zaimplementowaną przez siebie metodę *fast marching*, obok możliwości analizy poszczególnych zjawisk sejsmicznych, ma jeszcze jedną ogromną zaletę – dzięki możliwości szybkiego wyznaczenia czasu i lokalizacji zjawiska – możliwość szybkiego wprowadzenia stosownych informacji do systemów wczesnego ostrzegania. To drugie zadanie możliwe jest do realizacji dzięki koncepcji Doktoranta – wcześniejszej budowy modelu „czasowego” 3D, z obliczonymi dla każdej komórki czasami niezbędnymi na dojście do niej fal ze wszystkich stacji sejsmicznych.

Przedstawiona przez Pana mgr Marcina Polkowskiego rozprawa doktorska, której osiągnięcia szczegółowo omówiłam powyżej jest przykładem także aplikacyjnej pracy geofizyczno - informatycznej, opartej na świetnie metodycznie zaplanowanych i wykonanych badań.

Przedstawione w rozprawie badania wskazują na bardzo dobre opanowanie przez Doktoranta zarówno warsztatu geofizycznego jak i informatycznego, co ma istotne znaczenie, nie tylko przy badaniu sejsmiczności lokalnej (Górny Śląsk, Legnicko – Głogowski Okręg Miedziowy), ale również badaniach globalnych. Umiejętność konstrukcji systemów komputerowych oraz tworzenia oprogramowania użytkowego przez Doktoranta dobrze rokuje na przyszłość w zakresie włączenia do badań geofizycznych zaawansowanego aparatu informatycznego (sprzęt, oprogramowanie, metody modelowania).

Oceniana przeze mnie praca Pana Marcina Polkowskiego jest bardzo dobrym przykładem świetnie napisanej rozprawy doktorskiej. Zarówno część „geologiczno - geofizyczna” rozprawy, jak i „sprzętowo – informatyczna” są napisane logiczne, jasno, w pełni udokumentowane graficznie i literaturowo.

W moim przekonaniu praca Pana mgr Marcina Polkowskiego pt. „Lokalizacja ognisk trzęsień ziemi metodą propagacji wstecznej z wykorzystaniem implementacji metody *fast marching* w modelu 3D obszaru Polski” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku „O stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz. u. Nr 65 poz. 595, z późniejszymi zmianami).

W związku z powyższym wnoszę do Rady Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego wniosek o dopuszczenie mgr Marcina Polkowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej
Pana mgr Marcina Polkowskiego
„Lokalizacja ognisk trzęsień Ziemi metodą propagacji wstecznej z wykorzystaniem
implementacji metody *fast marching* w modelu 3D obszaru Polski”

Wysoka ocena rozprawy doktorskiej Pana mgr Marcina Polkowskiego, którą sformułowałam w recenzji, upoważnia mnie do postawienia wniosku o jej wyróżnienie.

Oceniana przeze mnie praca Pana Marcina Polkowskiego jest bardzo dobrym przykładem świetnie napisanej rozprawy doktorskiej. Zarówno część „geologiczno - geofizyczna” rozprawy, jak i „sprzętowo – informatyczna” są napisane logiczne, jasno, w pełni udokumentowane graficznie i literaturowo. Rozwijając powyższe zdanie wymieniam elementy pracy doktorskiej, które uważam za szczególnie istotne i godne wyróżnienia.

1. Opracowanie trójwymiarowego modelu rozkładu prędkości fal sejsmicznych w obrębie skorupy dla obszaru całej Polski.

Wykorzystanie przez Doktoranta ogromnej ilości danych otworowych i sejsmicznych zaowocowało stworzeniem wiarygodnego komputerowego symulacyjnego modelu 3D o wysokiej rozdzielczości, którego zastosowanie do lokalizacji ognisk trzęsień ziemi (czas, współrzędne geograficzne i głębokość) daje bardziej wiarygodne wyniki, niż stosowane zwykle modele 1D.

Model ten wg mnie powinien stanowić również pole do szerokiej merytorycznej dyskusji geologów i geofizyków, często różniących się zdaniem, na temat przebiegu styku trzech głównych jednostek tektonicznych Europy: prekambryjskiej platformy wschodnioeuropejskiej, szwu transeuropejskiego (TESZ, na terenie Polski TTZ) oraz waryscyjskiej platformy zachodnioeuropejskiej i alpidów Karpat.

2. Novum w skali światowej jest wykonana przez Doktoranta implementacja metody *fast marching*, dzięki której można dla modelu 3D w sposób prosty i szybki wyznaczyć rozkład frontów falowych dla dowolnej stacji i komórki modelu. Obliczone czasy są zapisywane w poszczególnych komórkach modelu. Metoda, przedstawiona na międzynarodowej konferencji Amerykańskiej Unii Geofizycznej [2015], została entuzjastycznie przyjęta i jest już upubliczniona w serwisie *github.com*.

3. Wg mnie nowatorskim jest również zaproponowanie przez Pana Polkowskiego do lokalizacji ognisk zjawisk sejsmicznych metody „propagacji wstecznego frontu falowego”. Autor wykorzystuje metodę *fast marching* do obliczania, dla wszystkich rejestrujących zjawisko stacji sejsmicznych, frontów falowych dla kolejnych czasów mniejszych od czasu pierwszych wstąpień. Mając do dyspozycji dla wielu stacji rozkład frontów falowych w przestrzeni można określić czas ich maksymalnej koincydencji, co pozwala na lokalizację epicentrum i głębokości ogniska. Dodatkową zaletą jest szybkość uzyskiwania tych informacji, co umożliwia ich wprowadzanie do systemu wczesnego ostrzegania.

4. Umiejętność konstrukcji systemów komputerowych oraz tworzenia oprogramowania użytkowego przez Doktoranta dobrze rokuje na przyszłość w zakresie włączenia do badań geofizycznych zaawansowanego aparatu informatycznego (sprzęt, oprogramowanie, metody modelowania).

