

dr hab. inż. Piotr Krzywiec, prof. nadzw. ING PAN  
Instytut Nauk Geologicznych PAN  
ul. Twarda 51/55  
00-818 Warszawa  
email: piotr.krzywiec@twarda.pan.pl

Warszawa, 2017/01/14

**Recenzja rozprawy doktorskiej  
Pana mgr inż. Kamila Cichostępskiego zatytułowanej  
„Analiza zmian zapisu sejsmicznego z offsetem jako narzędzie do identyfikacji  
stref akumulacji gazu ziemnego w cienkowarstwowych utworach zapadliska  
przedkarpackiego”**

Recenzowana praca doktorska została przygotowana na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH pod kierunkiem dr hab. inż. Jerzego Deca. Stanowi ona interesujące studium geofizyczne dokumentujące zastosowanie nowatorskich metod przetwarzania i interpretacji danych sejsmicznych na potrzeby analiz złożowych gazonośnych utworów mioceńskich zapadliska przedkarpackiego.

Recenzowana praca doktorska łącznie ze spisem literatury liczy 219 stron i składa się z 7 rozdziałów: **(1) Wstęp – problematyka badawcza, (2) Teoretyczne podstawy zmian amplitud z offsetem, (3) Metody interpretacji złożowej bazujące na zmianach amplitudy z offsetem, (4) Budowa geologiczna zapadliska przedkarpackiego, (5) Analiza zmian amplitud z offsetem w cienkowarstwowych utworach zapadliska przedkarpackiego, (6) Podsumowanie, (7) Literatura.** Praca jest bogato ilustrowana, tak rozważania teoretyczno-metodyczne jak i wyniki swoich badań Doktorant zilustrował licznymi figurami, co znacznie ułatwia lekturę doktoratu i zrozumienie jego głównych tez. Po niewielkiej edycji znakomitą większość figur można byłoby wykorzystać do publikacji opartych na doktoracie, których przygotowanie byłoby rzecz jasna warto rozważyć, tym bardziej, że różne wątki swoich badań Doktorant prezentował już na kilku poważnych zagranicznych konferencjach.

W pierwszym rozdziale (**Wstęp**) Doktorant syntetycznie zarysował problematykę doktoratu, wskazując na utwory drobnoklastyczne, o niskiej przepuszczalności i porowatości jako miejsca akumulacji gazu ziemnego w obrębie zapadliska przedkarpackiego. Postawił on zarazem tezę o zakwalifikowaniu takich złóż do typu przejściowego między założami konwencjonalnymi i niekonwencjonalnymi. W przypadku gazu termogenicznego, generowanego – a następnie akumulowanego – w obrębie tego typu skał taka teza jest w pełni uprawniona. Trzeba jednak pamiętać, iż na obszarze zapadliska przedkarpackiego w obrębie jego mioceńskiego wypełnienia osadowego występuje znaczna ilość akumulacji gazu biogenicznego, a takim przypadku podział na złoża konwencjonalne i niekonwencjonalne nie jest do końca stosowny, szkoda, że Doktorant tego zagadnienia nieco szczegółowiej nie omówił (w tej bądź w kolejnych częściach swojego doktoratu). W rozdziale tym omówiony zostały też pokrótce zakres stosowania sejsmiki refleksyjnej do analiz złożowych, polegających na bezpośredniej detekcji stref nasyconych węglowodorami, szczególnie gazem ziemnym. Na koniec zdefiniowany został cel pracy, co ujęte zostało w następujący sposób: „*Celem niniejszej pracy jest ocena możliwości zastosowania metody analizy zmian zapisu*

sejsmicznego z offsetem do obrazowania stref nasyconych gazem w cienkowarstwowych utworach południowej części zapadliska przedkarpackiego”. Wskazano również na trzy poligony, dla których wykonane zostały przez Doktoranta prace interpretacyjne: (1). zdjęcie sejsmiczne 3D Waryś - Łętowice – Wierzchosławice, (2) zdjęcie sejsmiczne 3D Trzciana - Cierpisz – Zaczernie, oraz (3) zdjęcie sejsmiczne 3D Łańcut – Kańczuga. Wszystkie te dane, łącznie z danymi otworowymi, udostępnione zostały przez PGNiG S.A. i przygotowane przez Geofizykę Kraków.

Obszerny (65 stron) rozdział 2 zatytułowany **Teoretyczne podstawy zmian amplitud z offsetem** poświęcony został na bardzo szczegółowe i wyczerpujące omówienie zagadnień stojących na pograniczy petrofizyki i sejsmiki refleksyjnej, związanych z propagacją poprzecznych i podłużnych fal sprężystych i wpływem na nią zmian własności petrofizycznych ośrodka skalnego, w tym również tych będących efektem nasycenia przestrzeni porowej węglowodorami, w szczególności gazem ziemnym. Istotna część tego rozdziału dotyczy kluczowej dla recenzowanej pracy doktorskiej kwestii zmian amplitud fal sejsmicznych wraz z offsetem, które to zmiany leżą u podstaw metod wykorzystania danych sejsmiki refleksyjnej do detekcji stref nasyconych. Ta część doktoratu, obficie, szczegółowo i klarownie zilustrowana, zakończona jest omówieniem problematyki przetwarzania danych sejsmicznych na potrzeby analiz AVO.

Rozdział 3 **Metody interpretacji złożowej bazujące na zmianach amplitudy z offsetem** zawiera kluczowe z punktu widzenia całej pracy doktorskiej omówienie różnych – a jest ich naprawdę sporo – sposobów interpretacji danych sejsmicznych pod kątem detekcji stref nasyconych węglowodorami. Omówienie to podzielone zostało na dwie części. W pierwszej z nich Doktorant zajął się m.in. całą gamą atrybutów sejsmicznych, z których część została następnie wykorzystana przez niego do analizy danych z trzech wspomnianych powyżej poligonów badawczych. Druga część to szeroka analiza metod interpretacyjnych opartych na szeroko rozumianej inwersji danych sejsmicznych, prowadzące do opracowania profili sejsmicznych w wersji impedancji akustycznej. Tematyka tego rozdziału stanowiła zasadniczy punkt odniesienia dla analiz zaprezentowanych w rozdziale 5.

Charakterystyka geologiczna obszaru badań czyli zapadliska przedkarpackiego i jego mezo-paleozoicznego podłoża zaprezentowana została w rozdziale 4 (**Budowa geologiczna zapadliska przedkarpackiego**). Omówienie to, podobnie zresztą jak i rozdziały 2 i 3, przygotowane zostało na podstawie literatury przedmiotu, szeroko przeanalizowanej i cytowanej. W kontekście problematyki, którą zajmuje się Doktorant zagadnienia w kontekście budowy i ewolucji tego basenu osadowego nie mają zbyt wielkiego znaczenia, chciałbym jednak poniżej wskazać na kilka nieścisłości bądź lapsusów językowych, które należałoby skorygować, np. przed ewentualną publikacją wyników:

- str. 73: „W następstwie ścienionej płyty europejskiej ...” – powinno być „W następstwie subukcji ścienionej płyty europejskiej ...”
- str. 73: „Północna część zapadliska przedkarpackiego jest erozyjna, południowa natomiast tektoniczna, która wyznaczona jest przez czoło Karpat zewnętrznych w całości nasuniętych płasko na mioceńskie osady zapadliska przedkarpackiego ...”

- zamiast „część” powinno być napisane „granica”, część basenu osadowego nie może być erozyjna
- str. 74: „Decydujące znaczenie dla występowania złóż gazu ziemnego w utworach miocenu ma ukształtowanie podneogeńskiej powierzchni niezgodności pełniącej rolę regionalnego uszczelnienia w skali całego zapadliska.” – tego zdania zupełnie nie rozumiem, powierzchnia wyznaczająca spąg sukcesji mioceńskiej wypełniającej zapadlisko przedkarpackie nie może być uszczelnieniem dla złóż gazu w niej występujących.
- str. 74: Doktorant poprawnie określił pozycję stratygraficzną utworów podewaporatowych, ewaporatowych i nadewaporatowych, jednak potem często nawiązuje do nieaktualnego – co sam tu zauważył – podziału na dolny baden podewaporatowych, środkowy baden (ewaporaty) i górny baden + sarmat, podczas gdy utwory ewaporatowe są już górnobadeńskie.
- str. 75: „W osadach sarmatu wydzielono kilka głównych środowisk depozycyjnych, zawierających skały akumulujące gaz ziemny” – środowisko depozycyjne to kombinacja procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych związanych z depozycją różnych typów osadów, i nie może być wydzielane w osadach; to rzecz jasna skrót myślowy ale przed publikacją wyników warto tego typu błędy lingwistyczno-terminologiczne poprawić.
- fig. 4.1.3: NKS opisano w legendzie jako „nasunięcie karpacko-stebnickie” podczas gdy na szkicowych przekrojach geologicznych symbol ten umieszczono w obrębie frontalnej części orogenu karpackiego a nie na jego froncie.

Rozdział 5 zatytułowany **Analiza zmian amplitud z offsetem w cienkowarstwowych utworach zapadliska przedkarpackiego** to *crème de la crème* pracy doktorskiej. Doktorant opisał w nim wyniki wykonanych przez siebie analiz danych sejsmicznych z trzech wcześniej wspomnianych poligonów. Analizy AVO etc. prowadzone były pod kątem detekcji akumulacji gazu ziemnego w obrębie utworów górnego badenu i sarmatu, bądź w gruboławicowych piaskowcach (zdjęcie sejsmiczne 3D Waryś – Łętowice) bądź w piaskowcowo-mułowcowych (zdjęcie sejsmiczne 3D Trzciana - Cierpisz - Zaczernie) albo mułowcowych-piaskowcowo (zdjęcie sejsmiczne 3D Łańcut - Kańczuga) utworach facji heterolitowej. Wyniki tych analiz zawarte zostały w trzech podrozdziałach o identycznej konstrukcji: *Charakterystyka geologiczna obszaru badań*, *Baza danych geofizycznych*, *Interpretacja danych sejsmicznych*, *Analiza AVO* oraz *Wnioski z wykonanych analiz*.

W każdym z podrozdziałów poświęconych poszczególnym poligonom znajduje się takie zdanie: „Zgodnie z zasadami stratygrafii sekwencji (Porębski, 1996) w obrębie utworów badenu górnego i sarmatu wyznaczono kolejne granice chronostratygraficzne: M1, M2, M3 oraz M4”. Szkoda, że Doktorant nie wyjaśnił co konkretnie miał na myśli, co to były za granice, z czym związane etc. Jest to tym ważniejsze, że te właśnie powierzchnie stanowiły punkt odniesienia do obliczeń atrybutów sejsmicznych etc. dla każdego poligonu. Korelacja danych sejsmicznych i otworowych – a w tym kontekście przeniesienie na dane sejsmiczne informacji stratygraficznych, litologicznych, facjalnych, złożowych etc. – została zilustrowana niestety tylko wybranymi otworami, mimo że z tekstu doktoratu wynika, iż to dowiązanie było zrobione dla większej ich liczby. Tego typu selekcję można byłoby zrobić np. do publikacji albo do prezentacji konferencyjnej, jednak do doktoratu było lepiej włączyć wszystkie korelacje.

Poligon 1 czyli zdjęcie sejsmiczne 3D Waryś–Łętowice. Opisując budowę geologiczną tego rejonu Doktorant niezbyt szczęśliwie użył dla frontalnej strefy deformacji kompresyjnych w obrębie jednostki zgłobickiej określenia „wał kompresyjny” - nie zajmuje się on rzecz jasna tektoniką / geologią strukturalną ale jednak powinien był używać standardowej terminologii tektonicznej a w niej coś takiego jak „wał kompresyjny” nie istnieje ... Nie jest też dla mnie jasne, dlaczego granice M2 i M3 nie zostały wyinterpretowane w obrębie tego elementu strukturalnego (czyli po prostu naskórkowego – *thin-skinned* - fałdu Biadolin), tym bardziej że następnie były one wykorzystywane do analiz złożowych. Wyjaśnienia wymagałoby też stwierdzenie, że fałd ten „... *poprzecinany jest wieloma uskokami tworzącymi uszczelnienie potencjalnych pułapek strukturalnych*”, gdyż w przypadku utworów mioceńskich potencjał uszczelniający uskoków jest raczej niewielki. Analizy AVO wykonano z wykorzystaniem kalibracyjnych danych z otworów Trzydniaki-1 i Gosławice-2. Uzyskane wyniki wykazały zgodność z teoretycznymi przewidywaniami dotyczącymi zmienności odpowiedzi sejsmicznej z offsetem dla piaskowców nasyconych gazem ziemnym. Wykonana analiza wykazała występowanie na badanym obszarze nasyconych gazem piaskowców zarówno III jak i II klasy AVO. Z grupy atrybutów refleksyjnych najlepiej obrazującymi występujące tu strefy złożowe okazały się atrybuty *Scaled Poisson's Ratio Change*, *Product Polaryzacji*, *Fluid Factor*, *Rs* oraz refleksyjne moduły geomechaniczne. Uzyskane wyniki pozwoliły na lepsze przestrzenne ograniczenie obszarów anomalnych związanych z akumulacjami gazu ziemnego.

Poligon 2 czyli zdjęcie sejsmiczne 3D Trzciana-Cierpisz–Zaczernie. Głównym problemem badawczym była tu kwestia zmiennej akumulacji gazu ziemnego w obrębie utworów heterolitowych w bardzo podobnych warunkach strukturalnych. Na początek kilka uwag terminologicznych: (\*) w opisie geologicznym tego obszaru (str. 131) znajdują się odniesienia do warstw baranowskich jako utworów dolnego badenu, ewaporatów jako utworów badenu środkowego i do utworów nadewaporatowych jako utworów badenu górnego i sarmatu, co jest sprzeczne z aktualnie obowiązującym podziałem stratygraficznym opisanym przez Doktoranta w rozdziale 4, (\*\*) na tej samej stronie znajduje się stwierdzenie, iż „*Miocen stebnicki podściela utwory nasunięcia karpackiego*” – nie ma czegoś takiego jak utwory nasunięcia karpackiego, nasunięcie jest powierzchnią bądź strefą wzdłuż której na północ nasunięte zostały Karpaty zewnętrzne. Dane otworowe z 7 otworów znajdujących się w obrębie tego zdjęcia sejsmicznego 3D zostały dowiązane z wykorzystaniem sejsmogramów syntetycznych, przy wykorzystaniu sygnałów wyekstrahowanych z danych sejsmicznych, jednak zaprezentowane zostały tylko dwa przykłady takiego dowiązania. Na str. 137 znajduje się wzmianka o facjach sejsmicznych (MF-A, MF-B, MF-C) wyróżnionych w obrębie formacji z Machowa, jednak opis ten jest bardzo skrótowy i nie pozwala na pełne zrozumienie kryteriów, wykorzystanych przez Doktoranta do powiązania ich odpowiednio z osadami turbidytowe równi basenowej i stożków podmorskich, osadów deltowych oraz płytkiego morza. Podobnie na str. 139 znajduje się stwierdzenie, że na analizowanym obszarze wydzielone zostały utwory deltowe oraz osady płytkiego morza, jednak brak jest uzasadnienia dla tej tezy. Być może zagadnienia te były opracowywane szerzej w ramach projektów badawczych, których częścią były badania zawarte w recenzowanym doktoracie – jeśli tak było to warto było to jednoznacznie opisać. W oparciu o dane sejsmiczne 3D skalibrowane danymi otworowymi Doktorant wykonał bardzo szeroki zakres analiz AVO, skupiając się na intrygującym problemie

występowania bądź braku akumulacji gazu ziemnego w bardzo blisko siebie położonych strefach antyklinalnych. Obliczone atrybuty AVO dobrze korelują się ze strefami nasycen gazem ziemnym, co potwierdzają dane otworowe oraz przeprowadzone próby złożowe, jednak uzyskane wyniki nie są do końca jednoznaczne co związane jest z m.in. brakiem pomiarów fali S, ograniczających możliwości analiz dotyczących własności geomechanicznych utworów mioceńskich.

Poligon 4 czyli zdjęcie sejsmiczne 3D Łańcut – Kańczuga. Wykonane analizy mają na celu określenie kryteriów interpretacji złożowej z wykorzystaniem metod AVO dla akumulacji gazu w obrębie utworów mułowcowo-piaskowcowych. W porównaniu do poligonu 2 sytuacja była w tym wypadku o tyle lepsza, że Doktorant dysponował pomiarami fali P, gęstości ale również pomiarami fali S. Tak jak poprzednio Doktorant napisał (str. 166), że „*Miocen stebnicki podściela utwory nasunięcia karpackiego*”, podczas gdy czegoś takiego jak utwory nasunięcia karpackiego nie ma, można sądzić, że chodziło tu o utwory budujące orogen karpacki. Mój duży opór budzi również termin „miocen wyruszony”, taka terminologia nijak nie przystaje do standardowej terminologii tektonicznej stosowanej dla orogenów nasuwczych. Nie powinno się również w żadnym razie pisać, że „*Nasunięcie karpacko-stebnickie Fl+Mst zapada monoklinalnie w kierunku południowym. Tworzą go kolejne nasuwające się na siebie skiby jednostki skolskiej, które podścielone są wyruszonym mioceniem stebnickim*” – nasunięcie czyli uskok nasuwczy to jest płaszczyna, wzdłuż której nasunięte zostały Karpaty zewnętrzne zbudowane z jednostki skolskiej i jednostki stebnickiej. Dowiązanie danych otworowych do danych sejsmicznych wykonano w oparciu o sejsmogramy syntetyczne korzystając z sygnału sejsmicznego wyekstrahowanego z danych sejsmicznych, tak jak poprzednio zilustrowano to jednak tylko dla wybranych 2 otworów. Również dla tego poligonu wydzielono facje sejsmiczne związane z utworami o różnej genezie (turbidyty równi basenowej i stożków podmorskich, osady deltowych oraz osady płytkiego morza) ale takiej asocjacji Doktorant zupełnie nie uzasadnił. Analizy AVO, wykonane w szerokim zakresie, korzystając z dostępnych otworowych danych kalibrujących, wykazały przydatność wykorzystania w interpretacji złożowej pomiarów fali S. Pozwalają one połączyć anomalie sejsmiczne z zmianami własności petrofizycznych, co jest szczególnie ważne w identyfikacji złóż gazu związanych z tzw. cienkimi warstwami oraz niekonwencjonalnych złóż gazu ziemnego, w których skały macierzyste są tożsame ze skałami zbiornikowymi.

Rozdział 6 to syntetyczne podsumowanie wykonanych analiz i interpretacji, wskazujące tak na obszary stosowalności analiz AVO jak i na problemy, w których uzyskiwane wyniki nie są zbyt wiarygodne.

Reasumując, można stwierdzić, iż pomimo pewnych niewielkich braków recenzowany doktorat to dojrzałe studium geofizyczno-złożowe oparte na analizie danych sejsmicznych i danych otworowych. Praca bez wątplenia stanowi samodzielny dorobek Doktoranta i dokumentuje jego wiedzę teoretyczną dotyczącą różnych aspektów przetwarzania i interpretacji złożowej danych sejsmiki refleksyjnej. Doktorant udowodnił, iż jest w pełni przygotowany do prowadzenia samodzielnych badań naukowych z wykorzystaniem zaawansowanych narzędzi interpretacyjnych. Biorąc to pod uwagę z pełnym przekonaniem mogę stwierdzić, że praca Pana mgr inż. Kamila Cichostępskiego zatytułowana „*Analiza zmian zapisu sejsmicznego z offsetem jako narzędzie do identyfikacji stref akumulacji gazu ziemnego w*

*cienkowarstwowych utworach zapadliska przedkarpackiego*” spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim w stosownej Ustawie o stopniach i tytule naukowym, i w związku z tym wnioskuję do Rady Naukowej WGGiOŚ AGH o dopuszczenie Doktoranta do dalszego postępowania w przewodzie doktorskim.

