

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

Warszawa, 15.12.2023

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Mariusza Łukaszewskiego zatytułowanej
„Wykorzystanie systemów samouczących w sejsmofacjalnej i strukturalnej
analizie danych sejsmicznych w strefach potencjalnego występowania
konwencjonalnych i niekonwencjonalnych złóż węglowodorów”**

1. WSTĘP

Recenzowana praca doktorska mgr inż. Mariusza Łukaszewskiego, zatytułowana „*Wykorzystanie systemów samouczących w sejsmofacjalnej i strukturalnej analizie danych sejsmicznych w strefach potencjalnego występowania konwencjonalnych i niekonwencjonalnych złóż węglowodorów*”, została przygotowana na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH pod kierunkiem prof. dr hab. Anny Świerczewskiej. Promotorem pomocniczym z ramienia Geofizyki Toruń był dr Paweł Pomianowski.

Praca powstała w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy” Ministerstwa Edukacji i Nauki. Zgodnie z informacją zamieszczoną na stronie internetowej Ministerstwa Edukacji i Nauki „*Przedmiotem programu jest tworzenie warunków do rozwoju współpracy podmiotów systemu szkolnictwa wyższego i nauki z otoczeniem społeczno-gospodarczym, prowadzonej w ramach szkół doktorskich i polegającej na kształceniu doktorantów we współpracy z zatrudniającymi ich przedsiębiorcami albo innymi podmiotami, której efektem będzie wdrażanie w tych podmiotach wyników prowadzonej przez doktorantów działalności naukowej*”. Aspekt wdrożeniowy jest w recenzowanej pracy doktorskiej bardzo klarownie wyartykułowany i można się w związku z tym spodziewać, że uzyskane wyniki faktycznie zostaną wdrożone do prac sejsmicznych realizowanych przez Geofizykę Toruń, dzięki czemu spełniony będzie jeden z kluczowych warunków programu „Doktorat wdrożeniowy”.

Praca liczy 224 strony i składa się z 12 rozdziałów: (1) **Wstęp**, (2) **Wprowadzenie**, (3) **Opis budowy geologicznej**, (4) **Historia badań sejsmicznych w rejonie badań**, (5) **Atrybuty sejsmiczne**, (6) **Metodyka prowadzonych badań**, (7) **Wyniki wykorzystania systemów samouczących w analizie danych sejsmicznych**, (8) **Interpretacja geologiczna wyników badań**, (9) **Podsumowanie i wnioski**, (10) **Spis rycin**, (11) **Bibliografia**, i (12) **Aneks**. Została przygotowana na generalnie wysokim poziomie edycyjnym, tak co do tekstu jak i ilustracji.

2. OMÓWIENIE I ANALIZA TREŚCI ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Dane sejsmiczne od ponad stu lat są jednym z głównych narzędzi badawczych w poszukiwaniach węglowodorów, a Polska – o czym napisał również Doktorant w swojej pracy - była jednym z pionierów w zakresie wykorzystania tych danych w pracach poszukiwawczych. Metoda sejsmiki refleksyjnej od momentu wprowadzenia jej do poszukiwań naftowych w latach 1920' – 1930' bardzo się rozwinęła, obecnie potrafimy zobrazować budowę geologiczną na głębokościach do

kilku – kilkunastu kilometrów z bardzo dużą dokładnością, tak w wersji 2D jak i 3D. Ostatnie lata to gwałtowny rozwój bardzo zaawansowanych technik interpretacyjnych, wykorzystujących analizy atrybutów sejsmicznych, inwersję danych sejsmicznych, a ostatnio również systemy samouczące i sztuczna inteligencję. Recenzowana praca doktorska, zrealizowana w ramach specjalnego modułu programu „Doktorat wdrożeniowy” poświęconego sztucznej inteligencji, dotyczy właśnie tego typu podejścia do interpretacji danych sejsmicznych, i tym samym pod względem metodycznym lokuje się w awangardzie nowoczesnych badań sejsmicznych.

W pierwszym rozdziale (**Wstęp**) Doktorant omówił pokrótce założenia programu MEiN „Doktorat wdrożeniowy” wskazując na jego trzy zasadnicze elementy: (1) rozwiązanie konkretnego problemu technologicznego, (2) rozwój zawodowy pracownika potwierdzony uzyskaniem stopnia naukowego doktora oraz (3) wzmocnienie współpracy badawczo-rozwojowej świata akademickiego z przemysłem. Uzyskanie stopnia naukowego doktora jest jeszcze przed Doktorantem, natomiast punkty (1) i (3) bez wątplenia należy uznać za spełnione. W rozdziale tym zostały również wprowadzone kluczowe pojęcia i definicje dotyczące systemów samouczących, kluczowych dla całej pracy doktorskiej.

Rozdział 2 (**Wprowadzenie**) składa się z czterech części. Pierwsza z nich, bez własnego numeru i podtytułu, to krótkie omówienie systemów samouczących i ich roli w poszukiwaniach naftowych. W pierwszym zdaniu tej części Autor napisał: *„Różne typy akumulacji węglowodorów pozostawiają swój własny ślad w zapisie sejsmicznym, tzw. sygnaturę sejsmiczną, którego znalezienie oraz prawidłowa interpretacja są kluczem do sukcesu poszukiwawczego”*. W kontekście zawartości recenzowanej pracy doktorskiej należałoby bez wątplenia to stwierdzenie rozszerzyć – interpretacje z wykorzystaniem systemów samouczących mogą służyć nie tylko detekcji akumulacji węglowodorów ale również szeroko rozumianych elementów systemów depozycyjnych oraz różnych szczegółów budowy strukturalnej, a zastosowanie uzyskiwanych wyników z pewnością może wykraczać poza poszukiwania ropy naftowej i gazu. W czasach transformacji energetycznej warto o tym pamiętać – sejsmika służy do obrazowania wglębnej budowy geologicznej a nie tylko do poszukiwania akumulacji węglowodorów. Część 2.1 „Celowość podjętych prac” zawiera syntetyczne uzasadnienie badań wykonanych w ramach pracy doktorskiej, które realizowano mając na względzie rosnące wymagania tak co do czasu poświęcanego interpretacji danych sejsmicznych jak i ilości szczegółowej informacji geologicznej pozyskiwanej w oparciu o dane sejsmiczne – te dwa elementy były punktem wyjścia do zaplanowania i realizacji badań opisanych w recenzowanej pracy doktorskiej. W części 2.2, zatytułowanej „Uzasadnienie wyboru obiektu badań”, Doktorant krótko wyjaśnił dlaczego wybrał taki a nie inny obiekt badań, wskazując na dostępność w przeanalizowanej przezeń części zapadliska przedkarpackiego wysokiej jakości danych sejsmicznych 3D oraz szeregu otworów możliwych do wykorzystania do kalibracji sejsmiki. Pojawiła się w nim również informacja, że w trakcie realizacji doktoratu Doktorant prowadził prace interpretacyjne o charakterze komercyjnym w ramach projektu realizowanego przez Geofizykę Toruń, dzięki czemu wyniki jego badań mogły być niejako „z marszu” wdrażane do praktyki przemysłowej, co w kontekście programu „Doktoraty wdrożeniowe” ma rzecz jasna kluczowe znaczenie. Część 2.3 „Dane źródłowe” to krótki opis nie tyle danych wykorzystanych do doktoratu – co mógłby sugerować tytuł – ile kwestii formalnych

związanych z pozyskaniem zgody PGNiG S.A. na ich wykorzystanie do zrealizowanych badań.

Rozdział 3 zatytułowany jest „**Opis budowy geologicznej**„. Jest to dość obszerne omówienie regionalnego i lokalnego tła geologicznego zrealizowanych badań. Autor dość szczegółowo omówił w nim procesy rządzące powstawaniem i ewolucją basenów (zapadlisk) przedgórskich odnosząc się do szeregu elementów charakteryzujących zapadlisko przedkarpackie. Omówienie to oparte jest na szerokiej bazie literaturowej i pokazuje, że Doktorant skrupulatnie przeanalizował literaturę przedmiotu. Rozdział ten stanowi bardzo dobry punkt odniesienia dla dalszej części doktoratu, jednak wskazać można jego słabsze elementy. Po pierwsze, omówienie basenów przedgórskich skoncentrowane zostało na zagadnieniach tektonicznych a kwestia systemów depozycyjnych została potraktowana dość lapidarnie (str. 24). Przeprowadzona interpretacja była skupiona na szczegółowym rozpoznaniu sarmackiego systemu depozycyjnego zapadliska przedkarpackiego i w tym kontekście szerszy, nieco szczegółowszy opis systemów depozycyjnych charakteryzujących baseny przedgórskiego byłby jak najbardziej celowy. Drugi problem jest nieco większego kalibru. W podrozdziale 3.4 „Litostratygrafia wschodniej części polskiego zapadliska przedkarpackiego” znajduje się syntetyczne omówienie różnych aspektów stratygrafii sukcesji mioceńskiej wypełniającej zapadlisko przedkarpackie. Do tego tekstu, opartego na bogatej literaturze przedmiotu, włączone jednak zostały przez Doktoranta fragmenty oparte na jego własnych interpretacjach danych sejsmicznych, dotyczące zarówno utworów podewaporatowych (str. 31-33) jak i nadewaporatowych (str. 35-36). Poza dość ogólnymi opisami wybranych wyników interpretacji (i odniesieniami do opracowania archiwalnego Łukaszewski & Popiela, 2021) znajdują się tam również wzmianki o różnych aspektach metodycznych interpretacji danych sejsmicznych, stanowiącej bazę dla tych wyników. Zupełnie nie wiadomo jak należy traktować te, samo w sobie niezwykle ciekawe, wyniki. Podrozdział 3.4 miał za zadanie wprowadzenie czytelnika doktoratu do ogólnej problematyki stratygraficznej omawianej części zapadliska przedkarpackiego a tego typu wprowadzenia z definicji opierane są na wynikach już opublikowanych a nie na w zasadzie niedostępnych opracowaniach archiwalnych. Wyniki te powinny być zostać omówione w rozdziałach 7 i 8 a nie we wstępnym rozdziale 3. Podobny problem jest z podrozdziałem 3.5 zatytułowanym „Model geologiczny rejonu badań w świetle wyników interpretacji zdjęcia sejsmicznego 3D” – jego tytuł brzmi tak jakby to było podsumowanie doktoratu. Trudno ocenić ten podrozdział gdyż nie został on poprzedzony żadnymi informacjami na temat wykorzystanych danych, metodyki i celu przeprowadzonych badań – bez wątpienia powinien on się znaleźć w dalszej części doktoratu, tam gdzie prezentowane są wyniki prac zrealizowanych przez doktoranta. Wśród pomniejszych mankamentów rozdziału 3 trzeba wymienić:

1. informację o paleoceńskim wieku inwersji SE części bruzdy śródpolskiej (str. 25) podczas gdy inwersja ta zaczęła się już w turonie-koniaku co zostało opisane w publikacjach opartych na danych sejsmicznych i terenowych
2. trudne do zrozumienia stwierdzenie dotyczące utworów mioceńskich „litologiczne wykształcenie i jego wpływ na efekt zachodzących przemian diagenetycznych” (str. 30)

3. brak odniesień do opublikowanych wyników prac terenowych dokumentujących ruchy przesuwcze wzdłuż zrębu Ryszkowej Woli (Nescieruk i in., 2007)

W rozdziale 4, zatytułowanym „**Historia badań sejsmicznych w rejonie badań**”, Doktorant dość szczegółowo opisał początki i rozwój badań sejsmicznych w obrębie zapadliska przedkarpackiego, zaczynając od ich „pra-początków” w latach 1920’ – 1930’ a kończąc na nowoczesnych współczesnych badaniach 3D. Wspomniane zostały również badania oparte na danych otworowych takich jak upadomierz. Jedyna uwaga do tego rozdziału dotyczy ryc. 4.1 – brak na niej jest jednostki borysławsko-pokuckiej, związanej z pokazanym na tej mapce ciągiem bardzo ważnych złóż Starego Sambora (na mapce niepoprawnie nazwanego złożem Sambora) – Borysławia - Doliny etc.

Rozdział 5, zatytułowany „**Atrybuty sejsmiczne**”, podzielony został na dwie części. Pierwsza z nich czyli podrozdział 5.1 „Definicje, taksonomia, zastosowanie” to syntetyczne omówienie atrybutów sejsmicznych, od szeregu lat wykorzystywanych do szczegółowej interpretacji sejsmostratygraficznej i strukturalnej danych sejsmicznych 3D. W części drugiej 5.2. „Systemy samouczące i automatyzacja procesów poznawczych” Doktorant opisał jak w kontekście analiz opartych o atrybuty sejsmiczne lokują się nowoczesne metody interpretacyjne oparte na systemach samouczących, wskazując ich słabsze strony i zarazem podkreślając coraz większy zakres ich zastosowania w badaniach geologicznych opartych o dane sejsmiczne.

Rozdział 6 „**Metodyka prowadzonych badań**” zawiera szczegółowy opis metodyki analiz atrybutowych opartych o systemy samouczące wykorzystanych w trakcie realizacji doktoratu. Doktorant omówił w nim bardzo szczegółowo i przejrzysto (1) miejsce systemów samouczących w sekwencji projektu sejsmicznego, (2) wykorzystywany software (w tym – co należy mocno odkreślić – również swoje własne autorskie narzędzia opracowane z wykorzystaniem języka *Python*), (3) procedury przygotowywania danych do planowanych analiz, oraz podstawowe metody interpretacyjne takie jak (4) analiza składowych głównych, (5) nienadzorowana klasyfikacja facji sejsmicznych z wykorzystaniem sieci neuronowych, (6) nienadzorowana klasyfikacja facji sejsmicznych z wykorzystaniem algorytmu *k*-średnich, oraz (7) nienadzorowana klasyfikacja facji sejsmicznych z wykorzystaniem samoorganizujących się map cech Kohonena. Podobnie jak w przypadku rozdziału 3, również tutaj znalazły się opisy wyników uzyskanych przez Doktoranta – ich miejsce było w innym rozdziale, w tej części doktoratu powinien znaleźć się tylko opis metodyki przeprowadzonych badań, tak jak to anonsuje tytuł tego rozdziału.

Rozdział 7, zatytułowany został „**Wyniki wykorzystania systemów samouczących w analizie danych sejsmicznych**”. Opisano w nim bardzo szczegółowo efekty zastosowania systemów samouczących do analizowanych danych sejsmicznych ze wschodniej części zapadliska przedkarpackiego z wykorzystaniem metodyki opisanej w rozdziale 6. Atrybutowe modele klasyfikacyjne opracowane zostały z wykorzystaniem nienadzorowanych algorytmów opartych o sieci neuronowe, o wykorzystanie *k*-średnich, oraz o samoorganizujące się mapy cech Kohonena czyli z wykorzystaniem wszystkich opcji metodycznych. Tego typu podejście pozwoliło na przetestowanie wszelkich opcji analizy danych sejsmicznych i wybór optymalnego

podejścia. Atrybutowe modele klasyfikacyjne przedstawiono również na wybranych pionowych sekcjach sejsmicznych wyekstrahowanych z danych sejsmicznych 3D, przechodzących przez kalibrujące otwory wiertnicze. Nie do końca jasna jest rola ostatniego rozdziału 7.5 zatytułowanego „Podsumowanie części metodycznej”. Metodyka badań przedstawiona została w rozdziale 6, rozdział 7 poświęcony został – zgodnie ze swoim tytułem - prezentacji wyników, rozważania metodyczne co do optymalnej strategii przetwarzania i interpretacji danych, same w sobie ważne i ciekawe, niezbyt tu pasują ...

Rozdział 8 zatytułowany **”Interpretacja geologiczna wyników badań,”** stanowi podsumowanie przeprowadzonych analiz. Doktorant zaprezentował w nim model geologiczny systemu kanałów podmorskich będący potencjalnym obiektem poszukiwawczym. Sam model jest dobrze dokumentowany wynikami sejsmicznymi, jednak byłby on lepiej zrozumiały gdyby oprócz ilustracji opartych o dane sejsmiczne pojawił się w końcowej części również jakiś blok-diagram pokazujący w uproszczony sposób wszystkie podstawowe elementy zidentyfikowanego mioceńskiego systemu depozycyjnego, optymalnie z wykorzystaniem danych z kluczowych otworów kalibracyjnych (karotaże, rdzenie). Warto to rozważyć w trakcie przygotowywania tych wyników do druku (do czego, mam wielką nadzieję, dojdzie). Wyjaśnienia wymaga również potencjalna sprzeczność między stwierdzeniem „Najprawdopodobniej kanały te związane są z jedną z faz progradacji systemu deltowego, wkraczającego do basenu od strony frontu orogenu karpackiego” (czyli od południa; str. 171) a kierunkiem dostawy materiału osadowego z NW na SE pokazanym na Ryc. 8-5. Szkoda, że zaproponowany model systemu depozycyjnego nie został skonfrontowany czy też zintegrowany z modelem systemu depozycyjnego dla położonego tuż obok zrębu Ryszkowej Woli (Mastalerz i in., 2006). Wydaje się również, iż zaprezentowane wnioski byłyby bardziej czytelne gdyby zostały ujęte w dwóch osobnych podrozdziałach – jednym dotyczącym zagadnień *stricte* geologicznych, i drugim dotyczącym problematyki złożowej. W tym drugim podrozdziale można było szczegółowo omówić kwestie wykorzystania uzyskanych wyników do poszukiwań konwencjonalnych ale również i niekonwencjonalnych złóż węglowodorów, co zostało zasygnalizowane w tytule ale nie znalazło odpowiedniego odbicia w tekście.

W rozdziale 9 **”Podsumowanie i wnioski,”** Doktorant krótko omówił zrealizowane przez siebie badania i sformułował wnioski tak co do uzyskanych wyników jak i sposobów dalszego wykorzystania technik interpretacyjnych opartych na systemach samouczących w praktyce poszukiwawczej. Warto tu raz jeszcze podkreślić, że te potencjalne zastosowania w żadnym razie nie ograniczają się do poszukiwań węglowodorów – sejsmika refleksyjna służy do obrazowania wgłębnej budowy geologicznej co owszem ma ogromne znaczenie w poszukiwaniach naftowych ale równie dobrze może być stosowane do zagadnień z zakresu sekwestracji dwutlenku węgla, geotermii i szeregu innych zagadnień, również w zakresie tzw. płytkich badań sejsmiczno-geologicznych (hydrogeologicznych, inżynierskich, kartograficznych etc.).

3. WNIOSEK KOŃCOWY

Reasumując, można stwierdzić, iż recenzowany doktorat, mimo stwierdzonych pewnych braków, to bardzo interesujące studium z zakresu zaawansowanej interpretacji danych sejsmicznych opartej na nowoczesnym podejściu

wykorzystującym systemy samouczące. Doktorant udowodnił swoją zdolność do prowadzenia samodzielnych badań naukowych odpowiednio definiując problem badawczy, odpowiednio dobierając metodykę badań dostosowaną do tego problemu oraz odpowiednio realizując zaplanowane badania. Biorąc to pod uwagę mogę bez wahania stwierdzić, że praca doktorska mgr inż. Mariusza Łukaszewskiego, zatytułowana *„Wykorzystanie systemów samouczących w sejsmofacjalnej i strukturalnej analizie danych sejsmicznych w strefach potencjalnego występowania konwencjonalnych i niekonwencjonalnych złóż węglowodorów”*, spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2023 poz. 742) i w związku z tym wnioskuję o dopuszczenie Doktoranta do dalszego postępowania w przewodzie doktorskim.