

IGF-SN-420-02/23

SEKRETARIAT NAUKOWY INSTYTUT GEOFIZYKI PAN	
WPLYNEŁO	
Data	25.09.2023r.
Nr dz.	.....Zat.
Ref.	.....

Prof. dr hab. Stanisław Mazur  
Instytut Nauk Geologicznych PAN  
Ośrodek Badawczy w Krakowie  
ul. Senacka 1, 31-002 Kraków  
e-mail: ndmazur@cyf-kr.edu.pl

Kraków, 07/09/2023

### Ocena rozprawy doktorskiej mgr. Julii Rewers

pt. „Analiza struktury i anizotropii górnego płaszczka pod Sudetami na podstawie danych z pasywnego eksperymentu sejsmicznego „AniMaLS”, przygotowanej pod opieką naukową dr. hab. Piotra Środy prof. Instytutu Geofizyki PAN.

#### **Zakres i cel pracy**

Recenzowana rozprawa składa się z dwóch publikacji, które ukazały się w latach 2021-2023 w zagranicznych periodykach naukowych o współczynnikach wpływu w granicach 1,8 – 2,9:

1. Bociarska, M., **Rewers, J.**, Wójcik, D., Materkowska, W., Środa, P., & AniMaLS Working Group. (2021). Passive seismic experiment “AniMaLS” in the Polish Sudetes (NE Variscides). *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 10(2), 183-202. (*Impact factor*: 1.8)
2. **Rewers, J.**, Środa, P., & AniMaLS Working Group. (2023). Seismic upper mantle anisotropy beneath the Polish Sudetes from SKS splitting—Effect of present-day asthenospheric mantle flow deflected by cratonic keel?. *Tectonophysics*, 846, 229687. (*Impact factor*: 2.9)

W jednej spośród tych dwóch prac doktorantka była pierwszą autorką.

Zamierzeniem recenzowanej rozprawy było uzupełnienie poprzednich badań sejsmicznych o nowe obserwacje z obszaru południowo-zachodniej Polski w celu lepszego wyjaśnienia przyczyn deformacji tektonicznych, jak również aktualnej dynamiki płaszczka pod Sudetami. Szczegółowym celem badań było lepsze poznanie struktury litosfery i astenosfery pod Dolnym Śląskiem, a w szerszym kontekście, poznanie struktury i ewolucji tektonicznej północno-wschodnich warwicydów przedłużających się na teren Polski z Czech i Niemiec. Rozprawa opiera się na wynikach pasywnego eksperymentu sejsmicznego „AniMaLS” (ang. *Anisotropy of the Mantle beneath the Lower Silesia*). Uzyskane rejestracje z dalekich trzęsień ziemi posłużyły do zbadania struktury górnego płaszczka oraz jego anizotropii, używając w tym celu metody rozszczepienia fali poprzecznej (ang. *shear-wave splitting analysis*). W celu oszacowania głębokości warstwy anizotropowej (będącej źródłem rozszczepienia fali poprzecznej) oraz jej miąższości, posłużono się wynikami z innych metod sejsmicznych, a także badań petrologicznych próbek ksenolitów płaszczka występujących w kenozoicznych bazaltach. Przeprowadzono także analizę otrzymanych wyników w szerszym kontekście badań anizotropii sejsmicznej w Środkowej Europie.

## **Struktura i zawartość rozprawy**

Tekst rozprawy obejmuje 133 stron druku, na które składają się streszczenia rozprawy w języku polskim i angielskim, angielskojęzyczne i polskojęzyczne omówienie wyników przeprowadzonych badań oraz dwa wymienione wyżej artykuły naukowe wchodzące w skład rozprawy.

Omówienie wykonanych badań i otrzymanych rezultatów obejmuje łącznie 14 stron tekstu podzielonego na 5 krótkich rozdziałów: (1) Wstęp, (2) Motywacja, (3) Wyniki, (4) Podsumowanie i (5) Bibliografia. Ten ostatni obejmuje 41 pozycji opublikowanych w czasopiśmie zagranicznych i krajowych. Omówienie nie zawiera figur odwołując się do artykułów naukowych stanowiących załączniki do rozprawy.

### Wstęp

Zawiera dość ogólne wprowadzenie w tematykę badawczą i znaczenie badań sejsmicznych dla poznania procesów tektonicznych w litosferze. Zawiera także pewne podstawy metodyczne, szczególnie istotne dla zrozumienia dalszych części rozprawy. W przypadku badań górnego płaszczka Ziemi, aktywne metody sejsmiczne nie są wystarczające ze względu na relatywnie ograniczoną głębokość penetracji nie sięgającą głębiej niż kilka-kilkanaście kilometrów poniżej Moho. Natomiast zapisy naturalnych trzęsień ziemi dają możliwość zbadania struktury i anizotropii sejsmicznej całego górnego płaszczka i dostarczają informacji o przeszłych i obecnych interakcjach pomiędzy płaszczem astenosferycznym i płytami litosferycznymi. Dominującym składnikiem górnego płaszczka jest oliwin, charakteryzujący się znaczną anizotropią prędkości fal sejsmicznych. W wyniku deformacji płaszczka kryształy oliwinu orientują się przestrzennie tworząc spójną orientację osi krystalicznych ziaren tego minerału (ang. *lattice-preferred orientation* - LPO). Orientacja osi największych prędkości fal sejsmicznych pokrywa się z kierunkiem uporządkowania osi krystalicznych oliwinu określając kierunki odkształcenia górnego płaszczka. Badania anizotropii sejsmicznej są zatem przydatne do identyfikacji kierunku maksymalnego wydłużenia elipsoidy deformacji w przypadku deformacji plastycznej w stanie stałym lub kierunków płynięcia materiału astenosferycznego w przypadku deformacji ośrodka o bardzo wysokiej podatności.

Pasywny eksperyment sejsmiczny "AniMaLS" (ang. *Anisotropy of the Mantle beneath the Lower Silesia*) został przeprowadzony w Sudetach stanowiących część orogenu waryscyjskiego. Eksperyment pozwolił na uzyskanie rejestracji dalekich (telesejsmicznych) trzęsień ziemi, włącznie z zapisami fal refrakcyjnych SKS i SKKS, które stały się przedmiotem analizy rozszczepienia fali poprzecznej (ang. *shear-wave splitting analysis*), co dostarczyło informacji na temat parametrów anizotropii górnego płaszczka pod Sudetami

### Motywacja

W tym rozdziale doktorantka powraca do znaczenia badań anizotropii górnego płaszczka, a także kontynuuje wątki metodyczne. W wyniku analizy rozszczepienia fal poprzecznych w ośrodku anizotropowym, która została wykorzystana w badaniach doktorantki, uzyskuje się następujące parametry: azymut polaryzacji szybkiej składowej fali oraz różnicę czasów wstąpień szybkiej i wolnej składowej fali. Wadą tej metody jest, mimo dobrej rozdzielczości poziomej, słaba rozdzielczość pionowa (głębokościowa), ponieważ obserwowany efekt rozszczepienia fali poprzecznej odzwierciedla anizotropię występującą gdziekolwiek wzdłuż drogi promienia sejsmicznego – od granicy jądro-płaszcz aż do powierzchni Ziemi.

Dalsza część rozdziału 'Motywacja' zawiera bardzo lakoniczny opis tektoniki badanego wycinka orogenu waryscyjskiego oraz krótki przegląd historii badań sejsmicznych zarówno z wykorzystaniem metod sejsmiki aktywnej jak i pasywnej. Z podsumowania rozdziału wynika, że motywacją podjęcia badań była chęć dostarczenia wyników o lepszej rozdzielczości w porównaniu z poprzednimi eksperymentami pasywnymi. W związku z tym przeprowadzono pasywny eksperyment sejsmiczny z wykorzystaniem 23 szerokopasmowych stacji sejsmicznych, rozmieszczonych w odstępach ~25-30 km na obszarze Sudetów. Dodatkowo zbiór danych został uzupełniony o zapisy z 8 stacji sejsmicznych polskiej i czeskiej sieci seismologicznej zlokalizowanych na tym obszarze.

### Wyniki

Wyniki projektu doktorskiego zostały zawarte w dwóch artykułach, które stanowią załączniki do rozprawy. Pierwszy artykuł (Publikacja #1) przedstawia charakterystykę danych sejsmicznych otrzymanych podczas pasywnego eksperymentu sejsmicznego "AniMaLS". Drugi artykuł (Publikacja #2) przedstawia wyniki badań anizotropii sejsmicznej górnego płaszczu w oparciu o metodę rozszczepienia fal poprzecznych SKS i SKKS zarejestrowanych w trakcie wspomnianego eksperymentu.

### Publikacja #1

W pierwszej pracy przedstawiono informacje na temat eksperymentu sejsmicznego "AniMaLS", którego celem było uzyskanie lepszego wglądu w strukturę skorupy ziemskiej i górnego płaszczu pod Sudetami. Sieć sejsmiczna składająca się z 23 tymczasowych stacji szerokopasmowych działała nieprzerwanie przez około 2 lata (od października 2017 do października 2019). Zbiór danych został uzupełniony o zapisy z ośmiu stałych stacji zlokalizowanych na badanym obszarze i w jego sąsiedztwie. Stacje zostały rozmieszczone w odległości około 25-30 km. W rezultacie uzyskano zapisy wydarzeń lokalnych, regionalnych i telesejsmicznych. Praca opisuje cele i motywację projektu, procedurę rozmieszczania stacji, a także charakterystykę tymczasowej sieci sejsmicznej i stacji stałych. Ponadto artykuł zawiera opis ważnych kwestii technicznych, takich jak konfiguracja transmisji danych, systemy monitorowania statusu stacji, kontrola jakości danych, czy przypowierzchniowa struktura geologiczna pod stacjami i związane z nią zakłócenia. Szczególną uwagę zwrócono w pracy na weryfikację prawidłowej orientacji czujników. Przeprowadzony eksperyment sejsmiczny dostarczył dobrej jakości rejestracji, które przeanalizowano w ramach kolejnej pracy przy użyciu kilku metod interpretacji sejsmicznej, w tym analizy parametrów anizotropii sejsmicznej, w celu poszerzenia wiedzy na temat struktury litosferycznej i sublitosferycznej oraz ewolucji tektonicznej badanego obszaru.

### Publikacja #2

W celu lepszego scharakteryzowania struktury i ewolucji górnego płaszczu pod Sudetami, autorzy przeprowadzili analizę rozszczepienia fal ścinających przy użyciu danych sejsmicznych z 23 tymczasowych i 8 stałych szerokopasmowych stacji sejsmicznych z okresu około dwóch lat. Fazy SKS i SKKS fal poprzecznych były analizowane przy użyciu metody minimalnej energii składowej transwersalnej i metody rotacji-korelacji w celu określenia średnich parametrów rozszczepienia, charakteryzujących orientację i stopień anizotropii płaszczu. Ostatecznie do obliczeń wykorzystano tylko wyniki pierwszej ze wspomnianych metod. Obserwacje zostały zinterpretowane w kategoriach anizotropii jednowarstwowej z poziomą osią symetrii. Średni azymut szybkiej polaryzacji dla badanego regionu jest równy ~113°, a czas opóźnienia ~1,1 s. Wyniki dokumentują wielkoskalowy

trend strukturalny górnego płaszczka o kierunku NW-SE do WNW-ESE, pokrywający się z osiami maksymalnej prędkości fal uzyskanymi z płytszych badań litosferycznych faz Pn i Pg. W mniejszej skali parametry anizotropii wydają się nieco różnić pomiędzy północno-wschodnią i południowo-zachodnią częścią obszaru Sudetów, co sugeruje umiarkowane różnice w orientacji struktury płaszczka. Różnice w małej skali prawdopodobnie odzwierciedlają zmiany anizotropii związane z różnicami pomiędzy blokami litosferycznymi, podczas gdy bardziej jednolity trend na dużą skalę może być związany z więźbą (*fabric*) mineralną indukowaną przez przepływ astenosferyczny. Szacowana grubość warstwy anizotropowej przekracza grubość płaszczka litosferycznego, potwierdzając związek obserwowanego trendu strukturalnego z podatnym odkształceniem astenosfery. Zgodnie z wcześniejszymi badaniami, wielkoskalowy trend szybkich polaryzacji obserwowany w Sudetach rozciąga się również na szerszym obszarze położonym na południowy zachód od strefy Teisseyre'a-Tornquista, niezależnie od orientacji szwów tektonicznych i nieciągłości litosferycznych. Sugeruje to astenosferyczne pochodzenie anizotropii płaszczkowej. Obserwowany trend biegnie ukośnie lub prostopadle do współczesnego kierunku ruchu płyty euroazjatyckiej, ale jest prawie równoległy do strefy Teisseyre'a-Tornquista o przebiegu NW-SE, wyznaczającej granicę grubej litosfery kratonu wschodnioeuropejskiego. Wspiera to koncepcję reorientacji plastycznego płynięcia w płaszczu astenosferycznym do kierunku ~NW-SE przez gruby kil kratoniczny występujący pod kratonem wschodnioeuropejskim.

#### Podsumowanie

Wyniki zaprezentowanej pracy doktorskiej mają szczególne znaczenie w kontekście uzupełnienia wiedzy o strukturze górnego płaszczka, niezbędnej do lepszego zrozumienia ewolucji tektonicznej nie tylko Sudetów, ale również, w szerszym kontekście, północnowschodnich waryscydlów. Na podstawie wyników analizy rozszczepienia fal poprzecznych SKS i SKKS, zarejestrowanych w trakcie pasywnego eksperymentu sejsmicznego "AniMaLS", uzyskano parametry anizotropii sejsmicznej. Mogą one stanowić wkład w poznanie współczesnej struktury litosfery pod Dolnym Śląskiem, poznanie interakcji pomiędzy płytą euroazjatycką a astenosferą jak również posłużyć do budowy modeli ewolucji tektonicznej.

#### Bibliografia

Jedna praca ze spisu literatury nie jest cytowana w tekście (Wüstefeld i in., 2008). Jednej pracy cytowanej w tekście brakuje w spisie literatury (Bormann i in., 1996). Praca Mazur i in. (2010) nie jest umieszczona w porządku alfabetycznym. Praca Rewers i in. (2023) nie jest prawidłowo cytowana w tekście (Rewers i Środa, 2023).

#### **Ogólna ocena rozprawy**

Rozprawa doktorska prezentuje wyniki zaawansowanej metodycznie analizy anizotropii sejsmicznej na obszarze polskiej części waryscydlów. Przedstawione dane charakteryzują się lepszą rozdzielczością niż te publikowane uprzednio. Dają one wgląd w anizotropię płaszczka litosferycznego i astenosfery. Są też ważnym uzupełnieniem danych z innych obszarów Europy Środkowej.

Rozprawa dokumentuje wysoki poziom fachowy doktorantki i dobre zrozumienie przez nią stosowanej metodologii. Mgr Julia Rewers wykazała się wszechstronnymi umiejętnościami zarówno

na etapie akwizycji danych, ich przetwarzania jak i interpretacji. Oba artykuły wchodzące w skład rozprawy doktorskiej są powiązane tematycznie i stanowią komplementarny zestaw prac. Zaprezentowane wnioski są uzasadnione wynikami przeprowadzonych analiz.

Zaprezentowane osiągnięcia mają potencjał do stania się punktem wyjścia dla dalszych badań i ewentualnego stworzenia dalszych publikacji. Cała rozprawa jest napisana przy użyciu prawidłowej terminologii fachowej, co świadczy o dobrym opanowaniu przez mgr Julię Rewers warsztatu badawczego w zakresie sejsmiki.

### Uwagi krytyczne

Oprócz niekwestionowanych osiągnięć, recenzowana rozprawa ma – oczywiście – również swoje strony słabsze. Mają one drugoplanowe znaczenie i nie wpływają na pozytywną ocenę pracy. Poniżej wskazuję na te elementy rozprawy, które można uznać za wątpliwe lub dyskusyjne.

1. Nie do końca jest jasna interpretacja wyników w kategoriach czasowo-przestrzennych, szczególnie w sytuacji małej rozdzielczości pionowej stosowanej metody. Obserwowana anizotropia wynika z kombinacji deformacji litosfery w epoce waryscyjskiej i współczesnego przepływu materii płaszcz astenosferycznego. Na stronie 30 autorka pisze: *„Porównanie otrzymanych wyników z wynikami aktywnych metod sejsmicznych z tego regionu (badania anizotropii skorupy i płytkiej części górnego płaszcz) oraz z orientacją głównych linii tektonicznych, pokazuje zbliżoną orientację anizotropii na różnych głębokościach, co sugeruje spójną deformację litosfery związaną z orogenezą waryscyjską.”* Ale zaraz potem dodaje: *„Azymuty fal o maksymalnej prędkości, obserwowane pod obszarem badań, wydają się być częścią wielkoskalowego trendu anizotropii płaszcz z dominującą orientacją NW-SE do WNW-ESE, rozciągającego się na różne jednostki charakteryzujące się różnym pochodzeniem i odmienną historią tektoniczną [...]. Ta wielkoskalowa spójność, wykraczająca poza granice jednostek litosferycznych, sugeruje znaczący udział anizotropii astenosferycznej.”* Jednak w Sudetach występuje tylko jeden trend anizotropii o orientacji WNW-ESE, nie licząc drobnych różnic po obu stronach uskoku śródsudeckiego. Zatem należy założyć, że w badanym obszarze trend anizotropii litosferycznej powstały w orogenezie waryscyjskiej jest przypadkowo zgodny ze współczesnym kierunkiem przepływu płaszcz astenosferycznego. Założenie to nie może być zweryfikowane przy pomocy zastosowanej metody.
2. Vladislav Babuška i Jaroslava Plomerová w kilku swoich pracach, w tym sztandarowej publikacji w Gondwana Research (2013), wyróżnili w Masywie Czeskim 5 domen płaszcz litosferycznego o odmiennych anizotropii. Te wyniki różnią się od tych zaprezentowanych w niniejszej rozprawie. Ich interpretacja jest również odmienna. Szkoda, że doktorantka nie podjęła szerszej dyskusji na ten temat.
3. Implikacje geologiczne są w rozprawie za słabo podkreślone. Chociaż w częściach wstępnych doktorantka wzmiankuje skomplikowaną budowę geologiczną Sudetów to jej wyniki są w większości neutralne względem tego problemu. Jak skomplikowana budowa Sudetów by nie była to nie ma ona wpływu na kierunki anizotropii w płaszczu astenosferycznym. Natomiast potencjalna anizotropia płaszcz litosferycznego jest tam dość jednolita. Jediną implikacją geologiczną pozostaje obecność kilku litosferycznych pod kratonem wschodnioeuropejskim, daleko poza obszarem badań. Szkoda, że doktorantka nie dostrzegła innego ważnego aspektu

geologicznego swoich wyników. Nie potwierdzają one istnienia szeroko dyskutowanej przez dziesięciolecia orokliny waryscyjskiej.

4. Struktura rozprawy nie wydaje się optymalna. Zamieszczenie dwóch wersji językowych omówienia wykonanych badań i otrzymanych rezultatów nie jest wymogiem ustawowym. Jeśli weźmiemy pod uwagę tylko jedną z wersji językowych to jest ona krótka, aby nie napisać zbyt krótka. Szkoda, że doktorantka nie zdecydowała się szerzej naświetlić aspektów metodycznych i geologicznych, czyli zagadnień, które z natury rzeczy nie mogły się zmieścić w oryginalnych publikacjach.
5. W rozprawie występują drobne błędy związane z użyciem terminologii geologicznej. Badania anizotropii sejsmicznej pozwalają na odtworzenie współczesnej struktury płaszczka litosferycznego a nie „historii jego deformacji”. Na podstawie anizotropii sejsmicznej można wnioskować o kierunkach odkształceń a nie „naprężeń”.
6. W rozprawie są pojedyncze literówki: „struktur” w pierwszym słowie streszczenia czy „stacji sejsmicznymi” na stronie 27. W swojej recenzji powstrzymałem się od wytykania błędów angielszczyzny, która nie jest pierwszym językiem Autorki.

#### **Podsumowanie recenzji**

Recenzowana rozprawa zawiera oryginalne osiągnięcia badawcze autorki, świadczące o jej dużej wiedzy i opanowaniu warsztatu badawczego w zakresie sejsmiki, a także o umiejętności samodzielnego prowadzenia badań.

Rozprawa zawiera oryginalne i metodycznie poprawne rozwiązanie zagadnienia naukowego, polegającego na wykorzystaniu analizy rozszczepienia fali poprzecznej do badania anizotropii płaszczka ziemskiego. Tym samym recenzowana praca jednoznacznie spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1668, z późniejszymi zmianami). Na tej podstawie recenzent wnioskuje o dopuszczenie mgr. Julii Rewers do publicznej obrony przedstawionych w jej rozprawie tez.



Kraków, 07 września 2023 r.