



**Institute of Geophysics  
Polish Academy of Sciences**

---

**Anisotropy estimation of Lower Paleozoic  
shales from northern Poland using  
microseismic data**

---

*Author:*  
WOJCIECH GAJEK

*Supervisor:*  
MICHAŁ MALINOWSKI, PHD

*A thesis submitted in fulfillment of the requirements  
for the degree of Doctor of Philosophy*

October 2019



## *Streszczenie*

Otworowy monitoring mikrosejsmiczny jest narzędziem szeroko stosowanym do oceny efektywności zabiegu szczelinowania hydraulicznego wykorzystywanego do intensyfikacji wydobycia gazu z łupków. Do lokalizacji wstrząsów mikrosejsmicznych, które są indukowane w momencie szczelinowania formacji łupkowych, konieczna jest znajomość pola prędkości fal sejsmicznych. Czynniki takie jak: różnorodność warstw skalnych, pierwotne uwarstwienie sedimentacyjne skał łupkowych czy obecność systemów spękań zwiększają złożoność górotworu. W odniesieniu do pola prędkości, powyższe czynniki skutkują obecnością anizotropii i tym samym zwiększają stopień skomplikowania pola prędkości. Konsekwentnie anizotropia powinna być uwzględniona podczas budowy pola prędkości fal sejsmicznych. Nieuwzględnienie anizotropii w obliczaniu lokalizacji wstrząsów mikrosejsmicznych może wprowadzać błędy w lokalizacji, przyczyniając się do niepoprawnej oceny efektywności zabiegu szczelinowania hydraulicznego.

Niniejsza praca skupia się na zagadnieniu określania anizotropii przy wykorzystaniu danych z otworowego monitoringu mikrosejsmicznego. Rozprawa proponuje nową metodykę inwersji anizotropowego modelu prędkości. Analizowane są także błędy lokalizacji wstrząsów mikrosejsmicznych powodowane brakiem uwzględnienia efektów anizotropowych w opisie pola prędkości. Rozważania teoretyczne poparte są aplikacjami omawianych narzędzi do rzeczywistych danych z monitoringu mikrosejsmicznego w celu inwersji anizotropowego modelu prędkości oraz wyznaczania parametrów obecnych w górotworze systemów spękań.

W niniejszej pracy prezentuję nową metodykę inwersji anizotropowego (VTI) modelu prędkości fal sejsmicznych opartej na czasach pierwszych wstąpień fal P, SH i SV oraz algorytm lokalizacji wstrząsów sejsmicznych w domenie prawdopodobieństwa, wraz z ich implementacją w postaci kodów obliczeniowych. Następnie przedstawiam modelowanie opisujące ilościowo błędy lokalizacji, których należy się spodziewać w przypadku braku uwzględnienia anizotropii w modelu prędkości. W celu przetestowania efektywności proponowanej metodyki w warunkach polowych przeprowadzam test symulujący użycie opracowanych kodów obliczeniowych równocześnie z trwającym szczelinowaniem hydraulicznym pod kątem uzyskiwania interpretacji wyników monitoringu na bieżąco.

Kolejnymi elementami pracy są dwa zastosowania przedstawionych metod do danych z otworowego monitoringu mikrosejsmicznego prowadzonego podczas szczelinowania hydraulicznego dolnopaleozoicznych łupków gazonośnych Pomorza w otworze Lubocino. Pierwsza z aplikacji przedstawia inwersję anizotropowego (anizotropia polarna typu VTI) modelu prędkości z wykorzystaniem czasów pierwszych wstąpień strzałów perforacyjnych. Dzięki inwersji precyzyjnego modelu możliwe staje się

przeprowadzenie wysokiej jakości lokalizacji wstrząsów mikrosejsmicznych, indukowanych w wyniku szczelinowania hydraulicznego. Daje to podstawy do przeprowadzenia drobiazgowej oceny efektywności zabiegu szczelinowania i uzyskania odpowiedzi na pytanie, które jednostki geologiczne zostały efektywnie zeszczelinowane. W kolejnym eksperymencie na danych rzeczywistych badam zjawisko rozszczepienia fali poprzecznej w ośrodku anizotropowym w celu analizy anizotropii azymutalnej (HTI) generowanej przez system równoległych spękań pionowych. Anizotropia azymutalna zdominowana jest przez silniejszą anizotropię (VTI) generowaną przez teksturę skał łupkowych oraz cienkie warstwowanie poziome ośrodka skalnego. W oparciu o obserwacje zjawiska rozszczepienia fali S przeprowadzam inwersję modelu geomechanicznego. Wynikiem jest otrzymany ortorombiczny tensor sztywności, który łączy w swoim opisie dominującą anizotropię polarną (VTI) ze słabszą anizotropią azymutalną (HTI), powodowaną obecnością szczelin.

Na podstawie przeprowadzonych rozważań teoretycznych oraz pomyślnego zastosowania stworzonej metodyki do danych rzeczywistych stwierdzam, że uwzględnianie anizotropii podczas budowy modelu prędkości fal sejsmicznych dla zastosowań otworowego monitoringu mikrosejsmicznego każdorazowo zwiększa precyzję lokalizacji wstrząsów mikrosejsmicznych. W konsekwencji, przyczynia się to do poprawy jakości końcowej oceny efektywności zabiegu szczelinowania hydraulicznego. W oparciu o przeprowadzone symulacje dowodzę również, że stosowanie proponowanej metodyki inwersji anizotropowego (VTI) modelu prędkości jest możliwe do stosowania na bieżąco w warunkach polowych i może być wykorzystywane podczas trwającego zabiegu szczelinowania hydraulicznego.

## *Summary*

Downhole microseismic monitoring is a widely used tool for the assessment of hydraulic fracturing job effectiveness. During the process of fluid injection into the reservoir, new fractures develop due to the induced pressure, which gives rise to microseismic events. Therefore, a knowledge of an accurate velocity model is necessary in order to locate the induced microseismic events. Subsurface complexity is often raised by a horizontal layering, an intrinsic anisotropy of shales, and aligned fracture sets. That introduces anisotropic effects into the velocity field. In such a case, the anisotropy should be taken into account during the velocity model building. Otherwise, some errors will be introduced into the microseismic event locations, and hence, the interpretation of treatment effects will be biased. Therefore, this thesis is devoted to the anisotropy estimation using downhole microseismic data. It examines possible location errors caused when the anisotropy effect is not considered and proposes a technique of anisotropic velocity model inversion. It also presents field data examples of anisotropic model building and fractures characterization.

In this thesis, I introduce a new technique for anisotropic (VTI) velocity model inversion based on traveltimes of the P-, SH-, and SV-waves onsets and probabilistic event location algorithm. This is followed by synthetic studies showcasing errors expected in microseismic event locations when anisotropy is neglected. In addition, a feasibility study of performing quasi-real-time anisotropic velocity model inversion during an ongoing hydraulic fracturing job is included.

Then, I present two different applications of the developed methodologies to the field data from a downhole microseismic survey that was carried out to monitor hydraulic fracturing in the Lower Paleozoic gas-bearing shales in Lubocino well, Northern Poland. In the first application, the VTI anisotropic velocity model inversion using the traveltimes of perforation shots is applied. The accuracy of the model provides high-quality locations of microseismic events induced during the hydraulic treatment. Then, the locations become a basis for a detailed stage-by-stage evaluation of the stimulation performance and provide information about geological units that were successfully fractured.

In the second application, I utilize shear-wave splitting (SWS) measurements to reveal weak azimuthal (HTI) anisotropy caused by aligned fractures. The HTI is dominated by stronger VTI fabric produced by the alignment of anisotropic platy clay minerals and by thin horizontal layering. I perform the rock-physics model inversion based on SWS measurements to finally obtain an orthorhombic stiffness tensor, which links the dominant VTI fabric with HTI anisotropy produced by the presence of aligned vertical natural fracture sets in the shale-gas reservoir.

Finally, based on both synthetic and real data examples, it is concluded that taking the anisotropy into account during the velocity model building in downhole applications always enhances the accuracy of microseismic event locations, and hence, raises

the quality of the final assessment of hydraulic fracturing operation. It is also demonstrated that the proposed VTI anisotropic velocity model inversion can be implemented on-site during an ongoing industry operation.