

Streszczenie w języku polskim

Surowce mineralne są niezbędne dla funkcjonowania współczesnego społeczeństwa. Od niemal trzech dekad sejsmika refleksyjna jest skutecznie wykorzystywana w poszukiwaniu głębokich złóż rud metali w skorupie krystalicznej (ang. *hardrock seismic exploration*). Aby uzyskać obraz budowy geologicznej, zarejestrowane dane sejsmiczne poddaje się przetwarzaniu, a następnie obrazowaniu (migracji). Dotychczas, preferowanym podejściem, dopasowanym do regularnych układów pomiarowych i stosunkowo prostej geologii, było obrazowanie w domenie czasu. Wraz z popularyzacją metod sejsmicznych w poszukiwaniu złóż surowców, znaczna część akwizycji danych zaczęła być realizowana z wykorzystaniem nieregularnych profili 2D oraz zdjęć 3D. Co więcej, skomplikowana budowa geologiczna, typowa dla ośrodków obejmujących złoża minerałów sprawia, że obrazowanie w domenie czasu jest niewystarczające. W rozprawie przedstawiłem zastosowanie zaawansowanych metod obrazowania w domenie głębokości połączonych z budową wysokorozdzielczych modeli prędkości na potrzeby obrazowania skomplikowanych struktur związanych z występowaniem rud metali.

W pierwszej części skupiłem się na zaprezentowaniu ograniczeń standardowego obrazowania w domenie czasu w mapowaniu niemal pionowych struktur związanych z występowaniem polimetalicznych rud w rejonie kopalni Kylylahti (Finlandia). W tym celu wykorzystałem nieregularne zdjęcie sejsmiczne 3D pomierzone w ramach projektu COGITO-MIN. Porównałem obrazowanie uzyskane za pomocą standardowej migracji głębokościowej przed składaniem (ang. *Kirchhoff pre-stack depth migration* – KPreSDM) i jej wariantu zaawansowanego tzw. migracji koherencyjnej w strefie Fresnela (ang. *Coherency-Based Fresnel Volume Migration* – CBFVM) – połączenie migracji w strefie Fresnela (ang. *Fresnel Volume Migration* – FVM) i migracji koherencji (ang. *Coherency Migration* – CM). Dla badanego przypadku, obrazowanie w domenie czasu nie dało przekonujących wyników, podczas gdy zastosowanie migracji głębokościowej pozwoliło na wyznaczenie spągu skał ultramaficznych, tworzących tzw. strukturę Kylylahti. Migracja CBFVM zobrazowała także szereg płytszych struktur o dużym upadzie.

W drugiej części analizowałem różne klasy metod migracji głębokościowej oparte na technikach promieniowych (KPreSDM i CM) i na pełnym równaniu falowym (ang. *Reverse Time Migration* – RTM) na przykładzie profili 2D pochodzących z tego samego rejonu badań (Kylylahti). Zastosowanie KPreSDM pozwoliło na zobrazowanie tylko głównych struktur (pojawiających się w obrazowaniu w domenie czasu), przy czym były one zdecydowanie lepiej obrazowane za pomocą CM. Obraz uzyskany z wykorzystaniem RTM był bardziej zaszumiony w porównaniu do KPreSDM i CM, co było efektem braku dokładnego modelu prędkości. Jednocześnie, tylko metoda RTM pozwoliła na zobrazowanie wyraźnych refleksów wewnątrz struktury Kylylahti, w tym uzyskać bezpośrednią odpowiedź sejsmiczną pochodzącą od złoża Kylylahti.

W ostatniej części rozprawy zbadałem możliwość budowy wysokorozdzielczego modelu prędkości za pomocą inwersji pełnego pola falowego (ang. *Full-Waveform Inversion* – FWI). Wykorzystałem w tym celu dane z nieregularnego zdjęcia sejsmicznego 3D, pomierzonego w rejonie występowania rud żelaza (Ludvika, Szwecja) w ramach projektu SmartExploration. Do budowy modelu zastosowałem FWI w wariacie akustycznym, ograniczoną do wczesnych wstąpień fali P. Zaproponowałem sekwencję przetwarzania oraz strategię inwersji dedykowaną danym sejsmicznym mierzonym w skorupie krystalicznej. Model uzyskany z FWI posłużył następnie do migracji głębokościowej typu RTM. W porównaniu z innymi modelami prędkości, migracja z modelem prędkości z FWI, dała jakościowo najlepsze wyniki, m.in. dokładne odwzorowanie głównego refleksu związanego z okruszczeniem do głębokości ok. 1000 m oraz obraz przecinających go uskoku. W rezultacie wypracowałem pierwsze łączne podejście FWI-RTM w zakresie obrazowania sejsmicznego struktur związanych z występowaniem rud metali w skorupie krystalicznej.

Brij Bhushan Singh

Abstract in English

Mineral commodities are vital for modern society. Reflection seismics has been an effective method for the exploration of deep ore deposits in crystalline rocks for almost three decades now (so-called hardrock seismic exploration). Seismic data need to undergo processing and imaging to form the 2D and 3D representation of the subsurface. Time-domain imaging (migration) has been the preferred choice for handling data acquired in a hardrock environment, yielding good results for regularly sampled data and relatively simple geology. However, many surveys are acquired either as crooked 2D profiles or irregular/sparse 3D. Increasing geological complexity also makes time-domain imaging futile. In this thesis, I evaluate different methods of seismic depth imaging combined with high-resolution velocity model building for imaging challenging mineral exploration targets.

First, I demonstrated the limitations of standard time-domain imaging in mapping near-vertical structures hosting polymetallic sulphide mineralization at Kylylahti mine (Finland) using an irregular 3D seismic survey acquired within the COGITO-MIN project. I compared industry-standard Kirchhoff pre-stack depth migration (KPreSDM) and its advanced variant i.e., Coherency-Based Fresnel Volume migration (CBFVM), a combination of Fresnel Volume migration and Coherency migration (CM). Time-domain imaging failed to portray the base of the ultramafic rocks hosting mineralization (Kylylahti formation) and their internal structure. Both KPreSDM and CBFVM were able to delineate the base of the Kylylahti formation and CBFVM imaged some shallow steeply dipping reflectors, as well as high-amplitude reflections below the known extent of the Kylylahti formation.

In the second study, I investigated two classes of depth migration methods i.e., ray-based (KPreSDM and CM) and wave-equation based (RTM) using two 2D crooked profiles acquired at Kylylahti. KPreSDM was successful in mapping only the major events, i.e. the ones already present in time imaging results. CM produced much more focused images compared to KPreSDM but failed to image coherent reflectivity within the Kylylahti formation. RTM produced less-focussed and wiggly-in-nature images of the subsurface compared to both KPreSDM and CM in an overall sense which can be attributed to the lack of a well-resolved velocity model. However, RTM was the only method that provided imaging of coherent features within the Kylylahti formation, together with the direct imaging of the already-known sulphide mineralization.

In the final study, I investigated the possibility of building a high-resolution velocity model using an irregular 3D seismic survey acquired over the iron-oxide deposit in Ludvika, Sweden within the SmartExploration project. I used early-arrival-based acoustic full-waveform inversion (FWI) to build the P-wave velocity model. I developed a data preprocessing and inversion strategy for FWI tailored to the specifics of the hardrock seismic data. Subsequently, I used RTM for depth imaging using a range of velocity models. Among all, the FWI-derived velocity model produced the most focused and accurate depth image delineating mineralization down to a depth of ~1000 m together with the intersecting faults. As a result, I proposed a first-ever joint FWI-RTM imaging workflow for hardrock seismic exploration.



Bij Bhushan Singh