

SUMMARY

SUMMARY IN ENGLISH

Over the past twenty years, reflection seismology has been progressively used for mineral-exploration purposes. An important aspect of the seismic methods is the ability to indicate new areas of interest for near-mine exploration, which is crucial information for mines balancing at exhaustion and striving for ore discoveries in their operational extent. However, economic restrictions, source permitting, and challenging terrain conditions might significantly reduce the feasibility of a 3D active-source surveys at a given site. Recently, passive seismic imaging, using noise sources and utilizing seismic interferometry (SI), has come forward as a promising tool to image the Earth's interior without the requirement of having active sources.

We propose to use SI as a cost-effective method to support mineral exploration at a mining-camp scale. Toward this end, we developed 4 processing methods/methodologies that allow to utilize the continuous ambient-noise (AN) recordings for the purpose of reflection imaging in the mineral exploration content. This thesis reports theory and applications of four novel methods/methodologies that address: (i) detection of body-wave events in the continuous recordings, (ii) classification of AN recordings, (iii) selection of the optimal SI processing sequence and initial target delineation, and (iv) objective method for selection of passive data contributing constructively to the reflection retrieval. In our investigations, we use data from two passive seismic experiments acquired at the Kylylahti mine in Finland (i-iii), and in the Pilbara region of Western Australia (iv).

To obtain body-wave events required for passive imaging, we investigate the feasibility of an automatic illumination-diagnosis method and a machine-learning approach for binary detection of body-wave events in seismic AN recorded by large-number (large-N) receiver arrays. For this purpose, we develop two-step wave-field evaluation and event detection method (TWEED), which is an extension of an illumination-diagnosis method introduced previously for crossing lines to 3D seismic surveys with noncrossing lines.

Next, to provide a more thorough description of AN recordings, and identify more data that could be useful for imaging, we present a hybrid-approach methodology for UNSUPERVISED CLUSTERING of AN events recorded by a large-N array. The methodology allows the detection of multiple event classes and selectively using the events for, e.g., reflected body-wave imaging or surface-wave tomography with SI techniques. Our hybrid approach combines (i) array-processing techniques that

provide spatiotemporal characterization of continuous AN data and (ii) machine-learning (ML) techniques that rely on the array-processing outputs.

After developing generic methods for automatic characterization of every recorded noise panel, we introduce a 2D ambient-noise seismic interferometry (2D ANSI) processing workflow for reconnaissance imaging and as an evaluation tool for the future more detailed seismic acquisition (either passive or active) for datasets acquired in an active-mine environments. We indicate the relevance of ANSI in general structural delineation and optimization of both the acquisition design and AN recording parameters.

Finally, we design a CURVELET-BASED EVALUATION for detection of virtual-source gathers with reflection content and use this approach to assess the imaging potential of different AN recordings.

The outcome of developments reported in this thesis should be considered as an intermediate step towards adapting ANSI for the mineral exploration purposes as well as the set of practical solutions for getting new insights from AN data. Combining all tools described in this thesis allows to form a complete processing workflow that takes raw AN recordings as input, and gives reflection images of the subsurface as output.

SUMMARY

STRESZCZENIE W JĘZYKU POLSKIM

Sejsmika refleksyjna jest wykorzystywana w poszukiwaniu złóż rud metali już od ponad trzydziestu lat. Bardzo często metody sejsmiczne stosuje się do śledzenia kontynuacji strefy zmineralizowanej poza strefę aktualnie objętą wydobywaniem. Jest to szczególnie istotne dla kopalni balansujących na krawędzi wyczerpania zasobów, które usiłują zlokalizować nowe złoża w zasięgu swojej infrastruktury. Jednakże, badania sejsmiczne z użyciem aktywnych źródeł wzbudzania fal sejsmicznych uważane są za kosztowne, jak również wymagające pod względem pozwoleń na wejście w teren. Sytuację może zmienić wykorzystanie tzw. sejsmiki pasywnej i rejestracji szumu sejsmicznego, a następnie wykorzystanie teorii interferometrii sejsmicznej (IS) do obrazowania górotworu.

W niniejszej pracy, proponujemy wykorzystanie IS jako efektywnej kosztowo metody wsparcia procesu poszukiwania złóż rud metali na terenach aktywnych kopalni lub w obszarach objętych poszukiwaniami z antropogenicznymi źródłami szumu sejsmicznego (takimi jak np. wiercenia). W tym celu, opracowaliśmy cztery nowatorskie narzędzia przetwarzania danych, które pozwalają na wykorzystanie rejestracji szumu sejsmicznego do obrazowania ośrodka w kontekście poszukiwania złóż surowców mineralnych. Proponowana metodologia dotyczy: (i) detekcji zjawisk sejsmicznych zawierających fale objętościowe w ciągłych zapisach szumu sejsmicznego, (ii) klasyfikacji zapisów szumu sejsmicznego, (iii) selekcji optymalnej sekwencji przetwarzania bazującej na IS i wstępnego rozpoznania celu poszukiwań, oraz (iv) obiektywnego wyboru porcji szumu, dającego najlepsze obrazowanie górotworu. W badaniach wykorzystano pasywne rejestracje sejsmiczne z rejonu kopalni Kylylahti w Finlandii (i-iii) oraz z rejonu Pilbary w Australii (iv).

W celu detekcji zjawisk sejsmicznych zawierających fale objętościowe (wymaganych do obrazowania pasywnego), opracowaliśmy dwustopniową metodę ewaluacji pola falowego oraz detekcji (TWEED). TWEED jest rozwinięciem metody badania iluminacji dla krzyżujących się profili dwuwymiarowych (2D) do regularnej sieci z równoległymi liniami odbiorników, jak w przypadku trójwymiarowych zdjęć sejsmicznych.

Następnie, dla pełniejszego opisu zapisów szumu oraz dla identyfikacji większej ilości pasywnych danych przydatnych w obrazowaniu, wypracowaliśmy hybrydową metodologię do nienadzorowanej analizy skupień (ang. UNSUPERVISED CLUSTERING) zjawisk sejsmicznych. Metodologia ta pozwala na detekcję wielu typów

zjawisk oraz ich selektywne użycie do obrazowania refleksyjnego lub tomografii fal powierzchniowych z użyciem IS. Hybrydowość polega na połączeniu technik stosowanych w seismologii obserwacyjnej w analizie danych z dużych sieci czujników (ang. array processing) z metodami uczenia maszynowego (ang. machine learning).

Kolejnym krokiem po opracowaniu metod automatycznej charakteryzacji szumu, było zaproponowanie kompletnej metodologii przetwarzania 2D bazującej na teorii IS (2D ANSI), przeznaczonej do badań rekonesansowych oraz jako narzędzie ewaluacji parametrów przed bardziej złożonymi pomiarami sejsmicznymi (zarówno pasywnymi, jak i aktywnymi). Wykorzystując dane z rejonu Kylylahti, wskazujemy na przydatność podejścia 2D ANSI do generalnego rozpoznania strukturalnego oraz optymalizacji akwizycji (geometrii układu pomiarowego oraz parametrów rejestracji).

Ostatnią metodą opracowaną w ramach niniejszej pracy jest półautomatyczne podejście do oceny zapisów szumu pod względem ich przydatności do obrazowania sejsmicznego, wykorzystujące transformatę krzywkową (ang. CURVELET TRANSFORM) do parametryzacji wirtualnych kolekcji strzałowych.

Niniejsza praca stanowi krok w kierunku adaptacji teorii IS oraz zapisów szumu sejsmicznego w poszukiwaniach złóż rud metali, jak również dostarcza narzędzi do badania nieznanych wcześniej własności szumu. Połączenie wszystkich wypracowanych narzędzi tworzy kompletną sekwencję przetwarzania, w której danymi wejściowymi jest szum sejsmiczny, a na wyjściu otrzymuje się obraz drobnoskalowych perturbacji własności sprężystych ośrodka geologicznego (tj. jego refleksyjności).