

IGF-SN-420-22/22

SEKRETARIAT NAUKOWY INSTYTUT GEOFIZYKI PAN	
WPLYNEŁO	
Data	17.08.2024v.
Nr dz.	Zał.
Ref.	

Streszczenie

Sejsmiczność indukowana podziemnym zatłaczaniem płynów jest obecnie tematem szeroko zakrojonych badań naukowych. Wynika to zarówno ze zwiększonego zapotrzebowania na alternatywne źródła energii wykorzystujące tę technologię, na przykład tzw. wspomagane systemy geotermalne, jak i z konieczności poszerzania ogólnej wiedzy na temat wpływu płynów na powstawanie trzęsień Ziemi. Znany jest fakt, że podziemne zatłaczanie płynów może prowadzić do występowania destrukcyjnych wstrząsów sejsmicznych, takich jak wstrząs o magnitudzie 5.5 zarejestrowany 15 listopada 2017 roku w miejscowości Pohang w Korei Południowej. W związku z tym prowadzonych jest wiele prac mających na celu rozwinięcie metod pozwalających na kontrolowanie sejsmiczności indukowanej tą technologią. Jednym z ważnych aspektów tego zadania jest identyfikacja i obrazowanie podziemnej sieci spękań oraz monitorowanie jej rozwoju w czasie pod wpływem prowadzonego procesu zatłaczania. Cel ten może być osiągnięty między innymi poprzez wykorzystanie precyzyjnej relokalizacji zarejestrowanych wstrząsów sejsmicznych charakteryzujących się wysokim stopniem podobieństwa sygnałów, tzw. podobnych wstrząsów. Drugim istotnym czynnikiem jest określenie wytrzymałości nieciągłości na ścinanie. Zależy ona głównie od ciśnienia porowego, ale także od stopnia zniszczenia skał oraz gęstości spękań powstałych wskutek procesu zatłaczania. Ostatnie badania wskazują, że parametrem odzwierciedlającym wytrzymałość skał może być statyczny spadek naprężeń - jeden z parametrów opisujących źródło sejsmiczne. Cechuje się on jednak dużą niepewnością estymacji, co znacznie utrudnia jego interpretację. W ramach niniejszej rozprawy **przeprowadzono łączną analizę czasoprzestrzenną podobnych wstrząsów oraz ocenę zmienności statycznych spadków naprężeń, a następnie oceniono jej użyteczność do identyfikacji i opisu struktur sejsmogenicznych na obszarze wybranego pola geotermalnego.** W badaniach wykorzystano wysokiej jakości dane sejsmiczne i technologiczne z rejonu otworów iniekcyjnych Prati-9 i Prati-29 zlokalizowanych na terenie pola geotermalnego The Geysers w Kalifornii (USA). Łączna interpretacja uzyskanych wyników pozwoliła na uzyskanie bardziej szczegółowego obrazu struktury badanego ośrodka skalnego oraz dostarczyła wskazówek dotyczących procesów fizycznych odpowiedzialnych za generowanie wstrząsów w tym rejonie.

W pierwszym etapie badań uzyskano obraz podziemnej sieci spękań w rejonie otworów iniekcyjnych Prati-9 i Prati-29. Przy użyciu metody względnej relokalizacji podobnych wstrząsów odtworzono prawdopodobny przebieg trzech spękań oraz jednego uskoku. Struktury te były kilkakrotnie aktywowane sejsmicznie na przestrzeni pięciu lat, w okresie prowadzonego zatłaczania, a ich aktywacja w czasie odzwierciedla dynamiczną odpowiedź ośrodka geologicznego na zmieniające się tempo zatłaczania. W etapie drugim rozpoznano istotne statystycznie zmiany statycznych spadków naprężeń wstrząsów w czasie i przestrzeni. Zostały one zinterpretowane jako obraz zmian i różnicowania wytrzymałości nieciągłości na ścinanie. Zmienność statycznych spadków naprężeń wstrząsów w czasie, wykazującą trend odwrotny do zmienności tempa zatłaczania, uznano za skutek zmian ciśnienia porowego wpływającego na wytrzymałość nieciągłości. Zmienność statycznych spadków naprężeń w przestrzeni jest związana z rodzajem nieciągłości: trzy struktury zinterpretowane jako spękania generują wstrząsy charakteryzujące się istotnie wyższymi spadkami naprężeń niż wstrząsy powstające na uskoku. W tym przypadku różnicowanie spadków naprężeń również zostało powiązane ze różnicowaniem wytrzymałości nieciągłości, jednak wynikającym częściowo z różnego stopnia zniszczenia skał – zidentyfikowany uskok został opisany jako struktura lokalna z dobrze rozwiniętą, wysoce przepuszczalną strefą zniszczenia. W ramach pracy wykazano, że wpływ zmian ciśnienia

porowego na wartości statycznych spadków naprężeń wstrząsów jest obserwowany bez względu na przestrzenną niejednorodność wytrzymałości ośrodka skalnego. Warto podkreślić, że różnica pomiędzy rozpoznanymi spękaniem a uskokiem odzwierciedla się nie tylko w wartościach statycznych spadków naprężeń wstrząsów, ale także w ich aktywacji w czasie. Spękania są aktywowane głównie przy relatywnie wysokim tempie zatłaczania, natomiast uskok wykazuje zwiększoną aktywność sejsmiczną podczas okresów o relatywnie niskim tempie zatłaczania. Spękania są zatem najprawdopodobniej aktywowane przez wzrost ciśnienia porowego prowadzący do ich osłabienia. W przypadku uskoku, omówiono potencjalne mechanizmy fizyczne odpowiedzialne za jego nietypową aktywację, w tym możliwość wystąpienia poślizgu asejsmicznego. Przedstawione wyniki ukazują obraz reakcji ośrodka skalnego na zmienne tempo zatłaczania płynów oraz **dowodzą, że informacje uzyskane z czasoprzestrzennej analizy podobnych wstrząsów oraz z analizy zmienności statycznych spadków naprężeń wstrząsów są spójne, komplementarne i mogą być poddane łącznej interpretacji.**

Ponadto, zaprezentowane wyniki potwierdzają, że w rejonie otworów Prati-9 i Prati-29 zlokalizowanych na terenie pola geotermalnego The Geysers:

- 1) Identyfikacja i precyzyjna względna relokalizacja podobnych wstrząsów stanowi skuteczne narzędzie do obrazowania przebiegu podziemnych struktur oraz głównych ścieżek migracji płynów.
- 2) Analiza występowania podobnych wstrząsów w czasie ujawnia dynamikę reakcji ośrodka skalnego na operację podziemnego zatłaczania płynów.
- 3) Istotnie statystycznie zróżnicowanie statycznych spadków naprężeń wstrząsów w czasie i przestrzeni odzwierciedla zmiany i różnice w wytrzymałości ośrodka skalnego.
- 4) **łączna analiza czasoprzestrzenna podobnych wstrząsów oraz ocena zmienności statycznych spadków naprężeń wstrząsów może być skutecznie wykorzystana do identyfikacji i opisu struktur sejsmogenicznych w rejonie otworów Prati-9 i Prati-29.** Analiza taka pozwala na uzyskanie bardziej szczegółowego obrazu podziemnej sieci spękań oraz odpowiedzi ośrodka na proces zatłaczania płynów, a także dostarcza dodatkowych informacji o możliwych procesach fizycznych zachodzących w ośrodku skalnym.

Uzyskane wyniki stanowią istotny wkład w rozpoznanie ośrodków geologicznych poddawanych procesowi podziemnego zatłaczania płynów oraz obrazowanie rozwoju sieci spękań w trakcie tego procesu. Ponadto, wyniki te mogą być wykorzystane jako głos w toczącej się ogólnej dyskusji na temat zmienności statycznego spadku naprężeń, prowadzonej w ramach międzynarodowej grupy *Community Stress Drop Validation Study*. Warto podkreślić również możliwość wykorzystania uzyskanych wyników w innych badaniach dotyczących znaczenia płynów w powstawaniu trzęsień Ziemi.

SEKRETARIAT NAUKOWY INSTYTUT GEOFIZYKI PAN	
WPLYNEŁO	
Termin	17.05.2024r.
Nr dz.
Ref.

Summary

Seismicity induced by underground fluid injection is recently a topic of extensive research in the global scale. It is both due to an increased need for alternative energy sources utilizing this technology, such as Enhanced Geothermal Systems, and necessity of broadening the general knowledge about the influence of fluids on the occurrence of earthquakes. As observed recently in South Korea, such activity may lead to the occurrence of destructive events, such as the M5.5 Pohang earthquake in 2017. Therefore, a lot of effort is done to develop methods for controlling injection induced seismicity. One of the key aspects of this undertaking is imaging of underground fracture network development in space and time due to injection activities. This can be achieved, i.a., with the precise relocation of seismic events exhibiting high level of waveform similarity (so called multiplets). Another important information is the shear strength of discontinuities, which is influenced mainly by pore pressure, but also by the level of rock damage and density of fractures created due to injection. Recent studies indicate that one of the seismic source parameters, i.e., static stress drop, may reflect the strength of rocks. However, it usually exhibits high estimation uncertainty, which makes it difficult to interpret. Within this work a new approach to the imaging of geothermal sites is proposed in which **combined spatiotemporal multiplet analysis and static stress drop variability assessment is performed for identification and characterization of seismogenic structures under fluid injection conditions**. For the exemplary analysis, a high-quality dataset from the area of Prati-9 and Prati-29 injection wells at The Geysers geothermal field (USA) is used. Obtained results show that joint application of both methods improved an existing knowledge about the structure of this reservoir and provided some indications on physical processes responsible for the generation of seismic events there.

In this work, firstly a detailed image of the underground fracture network in the area of Prati-9 and Prati-29 injection wells was obtained using seismic signals recorded at local distances. Using relative relocation of multiple events three fractures and one fault plane were delineated. These structures were activated repeatedly over 5-year period of injection and the history of their activation in time reflects the dynamic response of the reservoir to the changing level of injection rate. Secondly, significant temporal and spatial variations of static stress drop were identified and interpreted as an image of variability in the strength of discontinuities. Temporal stress drop variations, inversely related to the variations of injection rate, were interpreted as a result of pore pressure fluctuations leading to the changes of strength of discontinuities. Spatial variability of stress drop was found to be connected with the type of identified discontinuities: three structures interpreted as fractures produced events with higher stress drops, whereas stress drops of the events delineating the fault plane were significantly lower. In this case, stress drop variability was also interpreted as an image of strength heterogeneity but partially caused by the differences in the level of rock damage – the fault was interpreted as a local structure with well-developed, highly permeable damage zone. Finally, it was proved that pore pressure changes influence static stress drops of earthquakes, regardless of the spatial heterogeneity of the reservoir. It is important to underline that the difference in stress drop between the types of structures (fractures and the fault) was also reflected in their activation in time: the fractures were activated mainly during injection peaks, whereas the fault exhibited higher activity during lower injection periods. Therefore, the fractures were interpreted as being activated by pore pressure increases, which resulted in a decrease of the faults' strength. Regarding the fault, potential physical mechanisms responsible for its atypical activation were discussed, including the possibility of aseismic slip occurrence.

Presented results provide an image of the reservoir response to injection operations and **prove the fact, that the information obtained from both multiplet and stress drop analyses is consistent, complementary and can be interpreted together.**

In particular, presented results confirmed that in the area of Prati-9 and Prati-29 injection wells at The Geysers geothermal field:

- 1) Multiplet analysis followed by precise relative relocation is an effective tool for imaging the structure of the reservoir and possible fluid migration paths.
- 2) Temporal analysis of the occurrence of multiple events reveals the dynamics of the reservoir response to injection operations.
- 3) Statistically significant temporal and spatial variations of static stress drop reflect changes in the strength of the reservoir.
- 4) **Combined spatiotemporal multiplet analysis and static stress drop variability assessment can be successfully used for identification and characterization of seismogenic structures in the reservoir around Prati-9 and Prati-29 injection wells.** Proposed joint analysis improves an image of underground fracture network and its response to fluid injection. Moreover, it also provides information about possible physical processes responsible for the generation of earthquakes during injection operations.

Obtained results constitute an important contribution to the characterization of reservoirs undergoing underground fluid injection and to imaging the development of fractures due to injection process. Moreover, the results can be treated as a voice in the ongoing general discussion on static stress drop variability, carried on within Community Stress Drop Validation Study. Finally, they could support other studies on the role of fluids in the generation of earthquakes.