

Projekt LOFRES – sejsmika pasywna LFS z wykorzystaniem szumu sejsmicznego

LOFRES project - low frequencies passive seismicity by use of seismic noise



*Dr hab. inż., prof. nadzw.,
Zenon Pilecki *)*



*Dr inż., prof. nadzw.
Zbigniew Isakow **)*

Treść: W artykule omówiono założenia metodyczne systemu LOFRES do pomiaru metodą niskoczęstotliwościowej sejsmiki pasywnej. System ten służy do badania budowy i właściwości przypowierzchniowych warstw ośrodka geologicznego z wykorzystaniem szumu sejsmicznego. Badania są wykonywane za pomocą dwóch metod: sondowania mikrosejsmicznego i interferometrii sejsmicznej. W artykule przedstawiono ich podstawy metodyczne oraz algorytmy przetwarzania i interpretacji danych sejsmicznych. Przedstawiono również przykłady wyników badań. W podsumowaniu wskazano na zalety i ograniczenia sejsmiki pasywnej. Podkreślono większe znaczenie metody interferometrii sejsmicznej w rozwiązywaniu zagadnień w geoinżynierii.

Abstract: This paper presents the methodological assumptions of the system LOFRES adapted for the low frequency passive seismicity. This system is used to study the structure and properties of subsurface layers of geological medium by seismic noise. The system uses two methods: microseismic sounding and seismic interferometry. The paper describes the methodological basis and the algorithms of processing and interpretation of seismic data. It also presents examples of research results. The summary points to the advantages and limitations of the passive seismicity. Greater importance of seismic interferometry methods in solving problems of geoen지니어ing was highlighted.

Słowa kluczowe:

system LOFRES, niskoczęstotliwościowa sejsmika pasywna, mikrosondowanie sejsmiczne, interferometria sejsmiczna, szum sejsmiczny regionalny, szum sejsmiczny lokalny, rozdzielczość, zasięg głębokościowy

Key words:

LOFRES system, low frequency passive seismicity, microseismic sounding, seismic interferometry, regional seismic noise, local seismic noise, resolution, depth penetration

1. Wprowadzenie

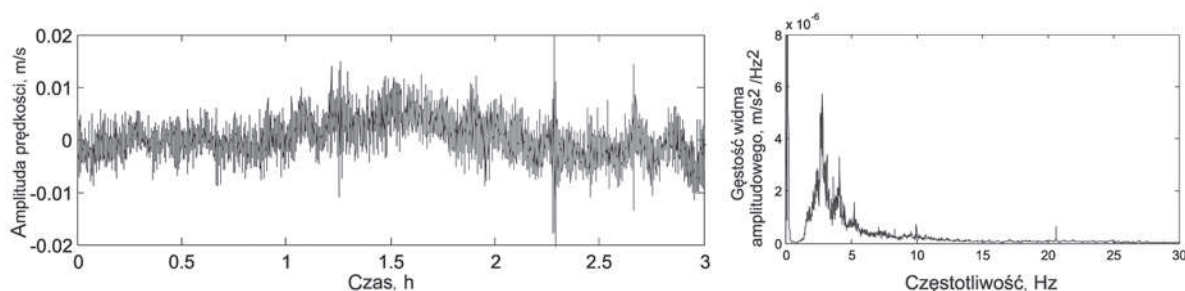
Celem projektu LOFRES było opracowanie nowatorskiego systemu pomiarowego niskoczęstotliwościowej sejsmiki pasywnej LFS (ang. *low frequency seismic*) do badania budowy i właściwości przypowierzchniowych warstw ośrodka geologicznego.

Sejsmika LFS bazuje głównie na analizie dyfuzyjnego pola sejsmicznego, tzw. szumu sejsmicznego jako rezultatu wielokrotnego rozpraszania fali sejsmicznej. Szum sejsmiczny może być: regionalny nazywany globalnym lub lokalny, nazywany kulturowym [16]. Szumy o charakterze regionalnym są wywołane na ogół przez procesy naturalne, np.

trzęsienia Ziemi, działalność wulkaniczną, falowanie mórz i oceanów, oddziaływanie prądów morskich na kontynenty lub oddziaływanie gwałtownych przepływów mas powietrznych. Szumy lokalne są wywołane drganiem od przejeżdżających pojazdów, pracą maszyn, urządzeń i człowieka lub wstrząsami indukowanymi działalnością górniczą lub inną (rys. 1). Częstotliwość analizowanych sygnałów sejsmicznych wynosi na ogół od 0,1 do 3 Hz w przypadku szumu regionalnego, a szumu lokalnego nawet do 30 Hz [5]. Maksymalny zasięg głębokościowy rozpoznania związany z częstotliwością analizowanej powierzchniowej fali sejsmicznej może wynosić od kilkudziesięciu metrów do kilku tysięcy metrów [6].

System LOFRES, ze względu na funkcje pomiarowe, jest przystosowany do badań dwoma metodami: sondowaniem mikrosejsmicznym MS (ang. *microseismic sounding*) i interferometrią sejsmiczną IS (ang. *seismic interferometry*). Obie

*) Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, **) Instytut Technik Innowacyjnych EMAG,



Rys. 1. Przykład szumu sejsmicznego z jego widmem amplitudowym zarejestrowanego na terenie górniczym
 Fig. 1. An example of regional seismic noise with its amplitude spectrum registered on the mining area

metody rozwinęły się w ostatnich latach wraz z postępem technologicznym w zakresie produkcji szerokopasmowych czujników oraz wzrostem mocy obliczeniowej komputerów. Zarejestrowany szum sejsmiczny jest wykorzystywany do wydzielenia fal powierzchniowych. Wynikiem przetwarzania i interpretacji są obrazy zmian różnych parametrów sejsmicznych. W przypadku MS jest to obraz zmian amplitud widma z głębokością, a w przypadku IS – obraz zmian prędkości fali poprzecznej z głębokością. Są to parametry, które mogą być pomocne w ocenie jakości górotworu.

W ostatnich latach pojawiło się wiele prac związanych z zastosowaniem sejsmiki pasywnej LFS. Należy zauważyć silny rozwój przede wszystkim metody IS. Najczęściej jest ona wykorzystywana do analizy regionalnych szumów sejsmicznych związanych z trzęsieniami ziemi. Na podstawie obliczonych krzywych dyspersji fal powierzchniowych wyznacza się przekroje głębokościowe prędkości fali poprzecznej w skorupie ziemskiej, np. [11, 19]. Pojawiają się prace związane z inżynierskim wykorzystaniem sejsmiki LFS w badaniach osuwisk [13]. Szersze omówienie zagadnień związanych z rozwojem metody interferometrii sejsmicznej można znaleźć w pracy [4].

System LOFRES został opracowany przez konsorcjum Instytutu Technik Innowacyjnych EMAG, Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN oraz Centrum Transferu Technologii EMAG. Szerszy opis systemu można znaleźć w pracy [9].

W artykule omówiono podstawy metodyczne dwóch metod sejsmiki LFS: sondowania mikrosejsmicznego i interferometrii sejsmicznej oraz przedstawiono założenia metodyczne systemu LOFRES. W podsumowaniu podkreślono zalety i ograniczenia sejsmiki LFS.

2. Podstawy metodyczne sondowania mikrosejsmicznego

W metodzie MS parametry fali powierzchniowej, estymowane z zapisów szumu sejsmicznego, są związane liniowymi zależnościami z budową i właściwościami ośrodka. Częstotliwość, dla której następuje zmiana amplitudy, związana jest z głębokością następującą zależnością

$$H = K \cdot \frac{V_R}{f}$$

gdzie:

- H – głębokość, m,
- K – współczynnik głębokości (od 0,35 do 0,5),
- V_R – prędkość fali Rayleigha, m/s,
- f – częstotliwość, Hz.

Badania prowadzone przez Gorbatikova i innych [6, 7, 8] wykazały związek amplitudy widma składowej pionowej fali Rayleigha z niejednorodną budową ośrodka geologicznego.

Fala Rayleigha, przechodząc przez strefę o słabszych parametrach sprężystych, w porównaniu do otaczającego ośrodka, zwiększa amplitudę. W ośrodkach bardziej sztywnych amplituda się zmniejsza.

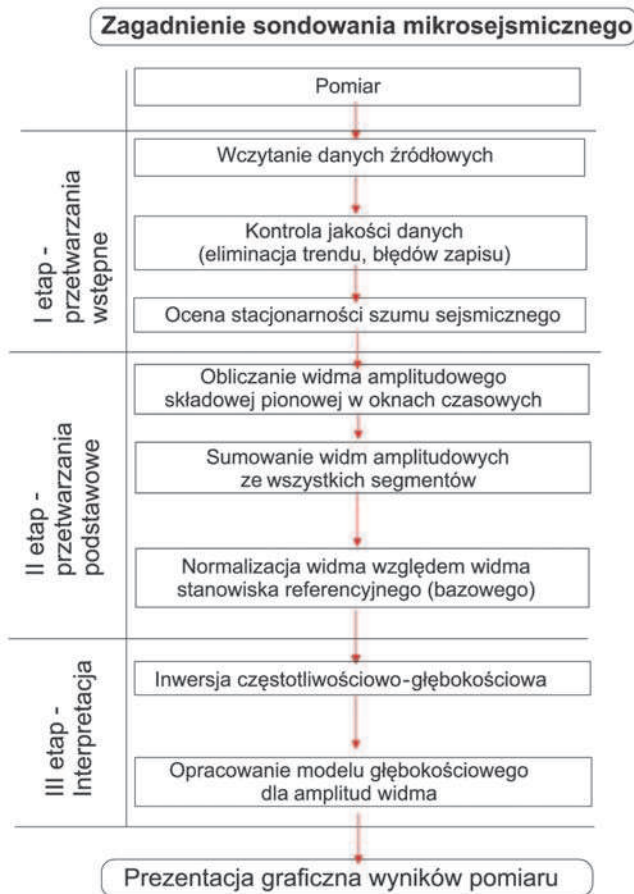
Badania metodą MS są realizowane z wykorzystaniem co najmniej dwóch stanowisk pomiarowych. Jedno stanowisko referencyjne, nazywane również bazą, jest stałe i nie zmienia swojego położenia w czasie pomiarów. Pozostałe są ruchome i mogą być przemieszczane do różnych punktów pomiarowych. Rejestracja w każdym punkcie jest prowadzona przez okres co najmniej jednej godziny w celu osiągnięcia stacjonarności zapisu. Do przetwarzania wykorzystuje się głównie składową pionową szumu sejsmicznego, natomiast rejestracje z pozostałych składowych mogą posłużyć w lepszym rozoznaniu charakteru pola falowego i jego stacjonarności. Na rysunku 2 przedstawiono podstawowe etapy przetwarzania i interpretacji danych sejsmicznych w metodzie sondowania mikrosejsmicznego. Szersze omówienie tego zagadnienia można znaleźć w pracach [6, 7].

Metoda MS znalazła zastosowanie przy rozpoznaniu wglębnej budowy geologicznej [2], monitoringu procesów wulkanicznych [20], badania anizotropii ośrodków [10], lub monitoringu sekwestracji CO₂ [1]. Przykład uzyskanych wyników w badaniach jakości górotworu pokazano na rysunku 3. Badania przeprowadzono na terenie górniczym nad filarem w utworach karbońskich, wytworzonym w wyniku obustronnej, wielopokładowej eksploatacji [17]. Dla porównania przeprowadzono symulację numeryczną stanu naprężenia i deformacji w rejonie wytworzonego filara.

3. Podstawy metodyczne interferometrii sejsmicznej

Metoda IS polega na odwzorowaniu odpowiedzi impulsowej ośrodka tzw. funkcji Greena, w obszarze między dwoma czujnikami, za pomocą korelacji wzajemnej lub dekonwolucji sygnałów sejsmicznych zarejestrowanych na tych czujnikach. Metoda jest oparta na założeniach sformułowanych przez Claerbouta [3], a opisana teoretycznie w pracach [12, 21]. Pierwsze eksperymenty polegające na obliczeniu funkcji Greena poprzez korelację wzajemną dyfuzyjnego, ultradźwiękowego pola falowego zapisanego na czujnikach piezoelektrycznych zostały przeprowadzone przez Weavera i Lobkisa [12, 22]. W sejsmologii pierwsze prace [2, 18] dotyczące odtworzenia funkcji Greena między parą sejsmometrów przeprowadzono dla korelacji wzajemnej fali koda. Zastosowanie metody IS w górnictwie przedstawiono w pracach [14, 17].

Metodyka IS nie wymaga spełnienia stacjonarności sejsmicznego pola falowego, dlatego nie jest konieczne zakładanie bazy referencyjnej jak w metodzie MS. Jest jednak konieczna zabudowa wszystkich linii profilowych od początku pomiaru, co wymusza posiadanie większej liczby czujników.



Rys. 2. Schemat przetwarzania i interpretacji danych sejsmicznych w metodzie sondowania mikrosejsmicznego przyjęty w systemie LOFRES [na podstawie 17]

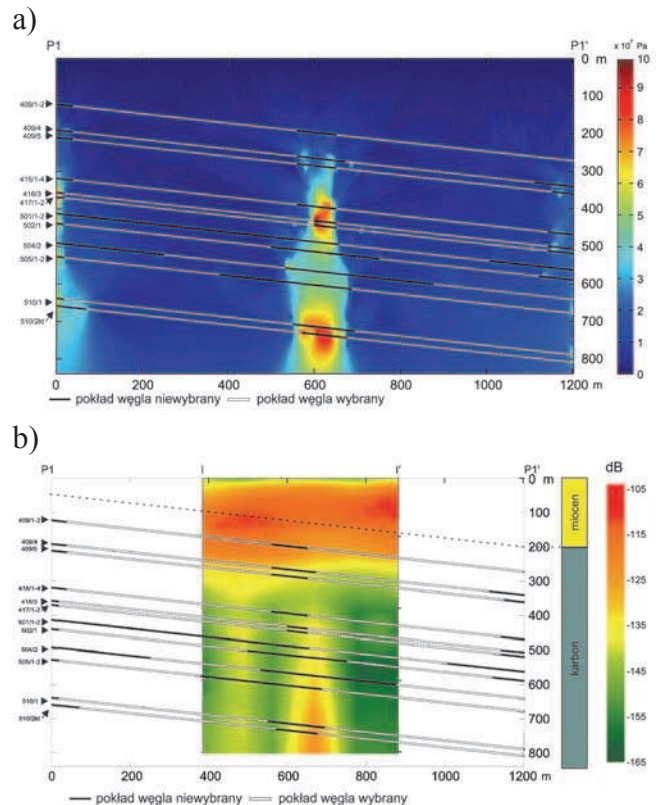
Fig. 2. Scheme of processing and interpretation of seismic data by microseismic sounding applied in LOFRES system [on the basis of 17]

W metodzie IS wykorzystuje się fale powierzchniowe, które niosą informację o budowie i właściwościach ośrodka geologicznego, opisane w postaci krzywych dyspersji. Można wykorzystać składową pionową fali Rayleigha i/lub składową poziomą fali Love'a. Fale powierzchniowe wydzielane są z zarejestrowanego szumu sejsmicznego za pomocą operacji matematycznych przetwarzania i interpretacji danych sejsmicznych pokazanych na rysunku 4. Natomiast na rysunku 5 pokazano przykład wyników otrzymanych tą metodą w porównaniu do wyników profilowania sejsmicznego w otworze.

W metodzie IS rejestracja jest prowadzona w sposób ciągły z krokiem próbkowania dobranym dla konkretnego zadania. W celu uzyskania większej rozdzielczości obrazu sejsmicznego, krok próbkowania jest mniejszy. Długość rejestracji zależy od charakterystyki pola falowego badanego rejonu, a zwłaszcza dominujących częstotliwości i kierunków propagacji oraz celu badań związanych z głębokością rozpoznania i rozdzielczością końcowego obrazu sejsmicznego. Generalnie im dłuższy jest pomiar tym dokładniejsza interpretacja. Z pracy [15] wynika, że po jednodniowym pomiarze szumu sejsmicznego możliwa jest korzystna estymacja fal powierzchniowych.

4. Założenia systemu LOFRES

System LOFRES jest przeznaczony do badania budowy i właściwości przypowierzchniowych warstw ośrodka



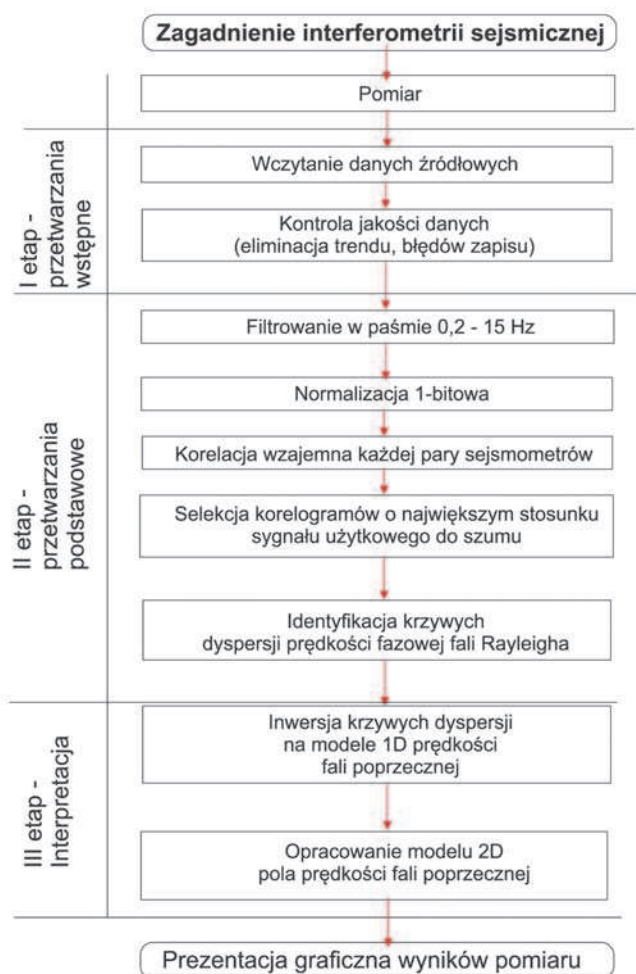
Rys. 3. Przykład wyników badań metodą sondowania mikrosejsmicznego na terenie górniczym: numeryczny model pola naprężenia pionowego w rejonie filara –a); obraz sejsmiczny zmian amplitudy widma składowej pionowej fali Rayleigha –b) dla identycznego przekroju [17]

Fig. 3. Example of microseismic sounding results measured on the mining area: numerical model of vertical stress field in the region of the pillar (upper); and seismic section of spectrum amplitude changes of vertical component of Rayleigh wave (lower) for the same cross-section [17]

geologicznego za pomocą sondowania mikrosejsmicznego i interferometrii sejsmicznej na podstawie rejestracji szumu sejsmicznego. System ten umożliwia w sposób automatyczny prowadzenie ciągłych pomiarów drgań w warunkach terenowych z odpowiednią dynamiką w zakresie niskich częstotliwości. W zależności od celu badań system pozwala na wykonywanie pomiarów w różnych konfiguracjach. Należy podkreślić, że istotnym powodem zainteresowania metodą niskoczęstotliwościowej sejsmiki pasywnej jest nieskomplikowany pomiar, a zwłaszcza brak potrzeby stosowania aktywnego źródła fal sejsmicznych.

System LOFRES składa się z części aparaturowej i programowej służącej do przetwarzania i interpretacji danych sejsmicznych. System LOFRES jest złożony z odpowiednio skonfigurowanych modułów pomiarowych i współpracującego z nimi centrum gromadzenia danych, przetwarzania i zobrazowania wyników.

System ten posiada mobilne, autonomiczne stacje pomiarowe wyposażone w jedno lub trójskładowe niskoczęstotliwościowe czujniki i stacjonarne stacje referencyjne wyposażone w trójskładowe niskoczęstotliwościowe czujniki. Stacje pomiarowe i referencyjne są wyposażone w zasilanie akumulatorowe lub bateryjne oraz odbiornik GPS do precyzyjnej synchronizacji podstawy czasu i określania położenia czujników podczas dokonywania pomiarów.



Rys. 4. Schemat przetwarzania i interpretacji danych sejsmicznych w metodzie interferometrii sejsmicznej przyjęty w systemie LOFRES [na podstawie 17]

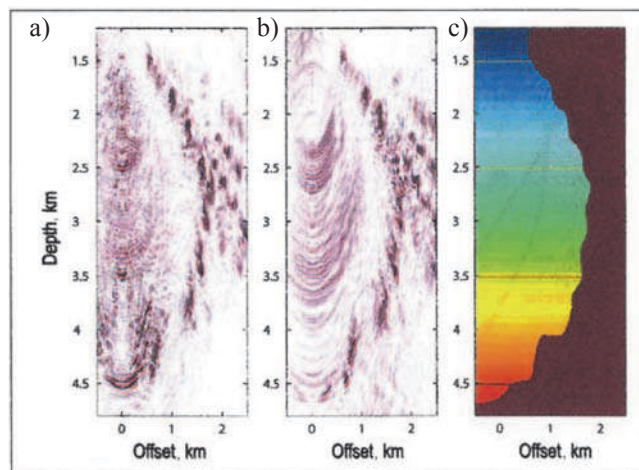
Fig. 4. Scheme of processing and interpretation of seismic data by seismic interferometry applied in LOFRES system [on the basis of 17]

System jest wyposażony w nośniki pamięci o dużej pojemności do gromadzenia rejestrowanych danych. Dostępna jest również wersja z radiową transmisją danych do centrum przetwarzania i interpretacji.

Rysunek 6 przedstawia przykład rozmieszczenia czujników na obszarze pomiarowym. Odległość między czujnikami i profilami pomiarowymi d_l i d_x jest uwarunkowana rozdzielczością poziomą i głębokością rozpoznania ośrodka. W trakcie pomiaru mobilne stacje pomiarowe mogą być cyklicznie przemieszczane w różne węzły siatki pomiarowej, co umożliwi badanie większego obszaru w sposób bardziej efektywny. W przypadku zastosowań, w których konieczne będzie ciągle śledzenie w czasie rzeczywistym zmian, np. w górnictwie – kontrola zmian stanu naprężenia i deformacji w górotworze, system pomiarowy może być zabudowany w terenie na stałe z większą liczbą stacji pomiarowych.

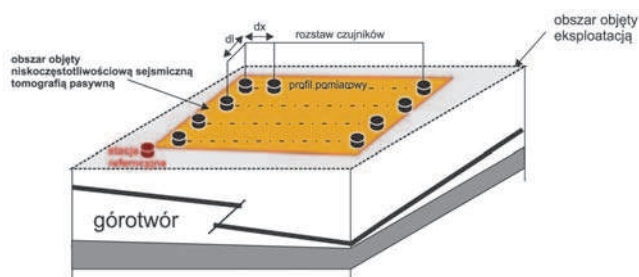
Oprogramowanie systemu LOFRES składa się z kilku głównych bloków strukturalnych, pozwalających na realizację następujących funkcji:

- AKWIZYCJA - rejestracja i archiwizacja danych pomiarowych.
- PRZETWARZANIE WSTĘPNE - poprawianie jakości



Rys. 5. Przykład wyników badań metodą interferometrii sejsmicznej: obraz granicy wysadu solnego opracowany na podstawie profilowania sejsmicznego w otworze –a); obraz granicy wysadu solnego na podstawie pomiarów metodą interferometrii sejsmicznej z czujnikami na powierzchni terenu –b); model prędkościowy –c) [23]

Fig. 5. Example of seismic interferometry results: final migrated image from VSP traces (left); image from back-propagated VSP traces (middle); velocity model (right) [23]



Rys. 6. Przykład schematu pomiarowego systemu LOFRES [17]

Fig. 6. Exemplary measurement scheme of LOFRES system [17]

danych pomiarowych (usuwanie trendów w zapisach, usuwanie wartości średnich itp.), analiza widmowa zarejestrowanych zapisów, analiza polaryzacyjna i obliczanie korelogramów,

- PRZETWARZANIE WŁAŚCIWE - wyznaczenie funkcji Greena dla fali powierzchniowej, opracowanie modeli krzywych dyspersji dla prawdopodobnego pola prędkości w ośrodku geologicznym,
- INTERPRETACJA - rozwiązywanie zagadnienia odwrotnego dla opisu badanego ośrodka geologicznego za pomocą parametrów sejsmicznych,
- EDYCJA WYNIKÓW - graficzne przedstawianie wyników obliczeń.

Testowe pomiary wykonane prototypem aparatury dostarczyły interesujących wyników [17]. Szerszy opis techniczny systemu można znaleźć w pracy [9].

5. Podsumowanie

W projekcie LOFRES podjęto prace badawczo-rozwojowe i konstrukcyjne związane z opracowaniem prototypu

systemu LOFRES oraz oprogramowania dla przetwarzania i interpretacji danych pomiarowych. Pierwsze prace badawcze zostały ukierunkowane na analizę struktury zniszczenia w górotworze na terenach górniczych. System umożliwia prowadzenie rozpoznania w rejonach nienadających się do stosowania aktywnej sejsmiki z powodu różnego rodzaju zakłóceń, lub ze względu na zagrożenia górnicze. W wyniku podziemnej eksploatacji górniczej górotwór często ulega zniszczeniu, aż do powierzchni terenu. Proces zniszczenia, ze względu na skomplikowaną budowę geologiczną, rozwija się w górotworze nierównomiernie. Sprzyja to powstawaniu stref koncentracji naprężenia i deformacji i może być źródłem silnych wstrząsów górotworu. Lokalizacja stref osłabienia w górotworze oraz ich monitorowanie w czasie wydaje się być interesujące dzięki zastosowaniu metody LFS. Zagadnienia te mogą mieć wymierny efekt w poprawie bezpieczeństwa prowadzenia prac górniczych oraz ochrony infrastruktury znajdującej się na terenach górniczych.

Istotną zaletą zastosowanej metody LFS jest nieskomplikowany pomiar, a zwłaszcza brak potrzeby użycia aktywnego źródła fal sejsmicznych. Na obecnym etapie rozwoju metody badań istotnym wyzwaniem jest poprawa rozdzielczości sejsmicznych obrazów wynikowych. W przypadku metody interferometrii sejsmicznej w schemacie bazującym na krzywej dyspersji, wiąże się to z uszczegółowieniem ich wielomodalności. W przypadku sondowania mikrosejsmicznego o rozdzielczości obrazu sejsmicznego decyduje częstotliwość fali powierzchniowej.

Metoda niskoczęstotliwościowej sejsmiki pasywnej, bazującej na pomiarze szumu sejsmicznego, posiada duże możliwości badawcze, lecz należy wziąć pod uwagę, że jest na początku drogi rozwoju i osiągnięcie istotnej przydatności użytkarnej wymaga jeszcze znaczącego wysiłku badawczego.

Artykuł został opracowany w wyniku realizacji projektu nr PBS1/A2/13/2013 o akronimie LOFRES uzyskanego w ramach I konkursu Programu Badań Stosowanych dofinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Literatura

1. *Boullenger B.*: Finite Difference Feasibility Modelling of Time-lapse Seismic Noise Interferometry for CO2 monitoring. TU Delft, Master Thesis, 2012.
2. *Campillo M., Paul A.*: Long-range correlations in the diffuse seismic coda. *Science*, 2003, 299(5606), 547-549.
3. *Claerbout, J. F.*: Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response. *Geophysics*, 1968, 33(2), s. 264-269.
4. *Czarny R.*: Przegląd zastosowania metody interferometrii sejsmicznej. „Przegląd Górniczy” 2014, nr 7 (w tym zeszytcie).
5. *Dangel S.*: Phenomenology of tremor-like signals observed over hydrocarbon reservoirs, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2003, 128 (1-3), s. 135-158.
6. *Gorbatikov A. V., Kalinina A. V., Volkov V. A. i in.*: Results of Analysis of Data of Microseismic Survey at Lanzarote Island, Canary, Spain, *Pure Appl. Geophys.*, 2004, 161, s. 1561–1578.
7. *Gorbatikov A. V., Stepanova M.*: Statistical characteristics and stationarity properties of low-frequency seismic signals, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2008, Vol. 44, No. 1, pp. 50–59.
8. *Gorbatikov A.V., Tsukanov A.A.*: Simulation of the Rayleigh Waves in the Proximity of the Scattering Velocity Heterogeneities. Exploring the Capabilities of the Microseismic Sounding Method, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2011, Vol. 47, No. 4, s. 354–369.
9. *Isakow Z., Pilecki Z., Sierodski P.*: Nowoczesny system LOFRES niskoczęstotliwościowej sejsmiki pasywnej. „Przegląd Górniczy” 2014, 7 (w tym zeszytcie).
10. *Lin F.C., Ritzwoller M.H., Yang Y., Moschetti M.P., Fouch M.J.*: Complex and variable crust and uppermost mantle seismic anisotropy in the western US. *Nature Geosci.*, 2011, 4, s. 55–61.
11. *Lin, F. C., Li, D., Clayton, R. W., Hollis, D.*: High-resolution 3D shallow crustal structure in Long Beach, California: Application of ambient noise tomography on a dense seismic array. *Geophysics*, 2013, 78(4), Q45-Q56.
12. *Lobkis, O. I., Weaver R.L.*: On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field: *Journal of the Acoustical Society of America*, 2001, 110, s. 3011–3017, doi: 10.1121/1.1417528.
13. *Mainsant, G., Larose, E., Brönnimann, C., Jongmans, D., Michoud, C., Jaboyedoff, M.*: Ambient seismic noise monitoring of a clay landslide: Toward failure prediction. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* (2003–2012), 2012, 117(F1).
14. *Marcak H., Pilecki Z., Isakow Z., Czarny R.*: Możliwości wykorzystania metody interferometrii sejsmicznej w górnictwie. „Przegląd Górniczy” 2014, nr 7 (w tym zeszytcie).
15. *Nicolson H., Curtis A., Baptie B., Galetti E.*: Seismic interferometry and ambient noise tomography in the British Isles. *Proceedings of the Geologists' Association*, 2012, 123, s. 74–86.
16. *Pilecki Z., Harba P., Czarny R., Cielesta Sz., Pszonka J.*: Źródła drgań w sejsmice inżynierskiej. „Przegląd Górniczy” 2014, nr 7 (w tym zeszytcie).
17. *Pilecki Z.* (kier. zadania): Raport z realizacji prac badawczych w projekcie LOFRES. IGSMiE PAN, Kraków 2014, (praca niepublikowana).
18. *Sneider R., Gret A., Huub D., Scales J.*: Coda wave interferometry for estimatic nonlinear behavior in seismic velocity. *Science* 2004, vol. 295, s. 2253-2255.
19. *Sneider R., Wapenaar J.*: Imaging with ambient noise. *Physics Today*, 2010, s. 45-49.
20. *Ueno T., Saito T., Shiomi K., Enescu B., Hirose H., Obara K.*: Fractional seismic velocity change related to magma intrusions during earthquake swarms in the eastern Izu peninsula, central Japan. *Journal of Geophysical Research*, 2012, Vol. 117, B12305, doi:10.1029/2012JB009580.
21. *Wapenaar, K., Fokkema, J.*: Green's function representations for seismic interferometry. *Geophysics*, 2006, 71(4), SI33-SI46.
22. *Weaver, R.L., Lobkis O.I.*: Ultrasonics without a Source: Thermal Fluctuation Correlations at MHz Frequencies. *Physical Review Letters*, 2001, 87, 134301.
23. *Willis M.E., Lu R., Campman X., Toksoz M.N., Zhang Y., de Hoop M. V.*: A novel application of time – reversed acoustics: salt-dome flank imaging using walkaway VSP surveys. *Geophysics*, 2006, Vol. 71, no. 2, A7-A11.