



Identyfikacja sejsmicznych zjawisk podobnych rejestrowanych w kopalniach podziemnych

Identification of similar seismic events recorded in underground mines

*Prof. dr hab. inż. Andrzej Leśniak**

Treść: W opisanej pracy przedstawiono metodę służącą do automatycznego grupowania zjawisk sejsmicznych na podstawie sygnałów zarejestrowanych siecią czujników w kopalniach podziemnych. Algorytm wyznaczania klastrów złożonych z sygnałów podobnych bazuje na parametrach obliczanych z uproszczonej obwiedni zarejestrowanego sygnału. W pracy opisano implementację oraz przykładowe wyniki działania algorytmu dla sygnałów zarejestrowanych siecią sejsmiczną w kopalni miedzi „Rudna”. Zauważono, że wyniki klasteryzacji są w dużym stopniu zależne od liczby kanałów rejestracyjnych aparatury sejsmicznej używanych do grupowania oraz wielkości progów wykorzystywanych do grupowania. Pogrupowane sygnały pozwalają na wzrost dokładności lokalizacji źródeł emisji i śledzenia wzrostu pojedynczych szczelin prowadzących do wystąpienia silnych wstrząsów.

Abstract: This paper presents the method of automated clustering of seismic events recorded by use of seismic network in underground mines. The proposed algorithm uses clusters of similar events (so called multiplsets). The degree of similarity between signals is established by use of parameters evaluated from the simplified envelopes of the recorded events. The paper presents a detailed description of the algorithm as well as the example of clustering for signals recorded in "Rudna" copper mine. The analysis shows that the results largely depend on the number of channels of recording equipment used for cluster evaluation, as well as thresholds used during the single link algorithm. The evaluated multiplsets allow to significantly increase the accuracy of source location of similar events and the rise in of effectiveness of seismic hazard evaluation.

Słowa kluczowe:

multiplsets, grupowanie zjawisk sejsmicznych, lokalizacja źródeł

Key words:

multiplsets, seismic events clustering, source location

1. Wprowadzenie

Emisja sejsmiczna rejestrowana w trakcie rutynowych obserwacji prowadzonych w kopalniach podziemnych dostarcza bezpośrednio informacji o procesach pękania górotworu. Skala tych procesów, ich tempo i charakter mogą być wnioskowane z dynamicznych parametrów zarejestrowanych sygnałów, a także poprzez lokalizację źródeł emisji oraz zmiany ich położenia w czasie. Doskonalenie zarówno metod obserwacyjnych, jak i procesu interpretacji rejestrowanego strumienia emisji sejsmicznej może przyczynić się do zwiększenia jakości rozpoznania dynamicznych zmian górotworu, a szczególnie intensyfikacji zmian prowadzących do jego gwałtownego pęknięcia.

Tworzenie się spękań w górotworze może być wynikiem różnorodnych procesów naturalnych lub indukowanych działalnością człowieka. W warunkach górniczych wstrząsy sejsmiczne mają z reguły charakter antropogeniczny, to znaczy powstają na skutek naruszenia równowagi górotworu robotami podziemnymi. W zależności od tych warunków mogą być generowane wstrząsy charakteryzujące się różnymi

mechanizmami źródeł. Generalnie w warunkach kopalnianych rozróżnia się mechanizmy izotropowe źródeł, mechanizmy odpowiadające jednoosiowemu ściskaniu lub rozciąganiu oraz mechanizmy ścinające, jednak większość rejestrowanych zjawisk zawiera każdą z tych składowych, lecz w różnych proporcjach [9]. W warunkach górniczych zaobserwowano ponadto, że wstrząsy pojawiają się w charakterystycznych grupach związanych poprzez swoją lokalizację i czas z miejscami prowadzonej eksploatacji [6]. Zwraca się również uwagę na sekwencyjność mechanizmu generującego wstrząsy w określonych miejscach [3]. Można rozróżnić tu trzy przypadki. Wstrząsy mogą być wstrząsami powtarzalnymi, właściwymi dla danego miejsca pokładu lub otaczającego go górotworu o porównywalnych warunkach geologiczno-górniczych, w szczególności na wybiegu frontu eksploatacyjnego. Drugim typem są wstrząsy incydentalne powstające w przypadku zbliżania się frontu robót do anomalnych warunków powodowanych zaburzeniami geologicznymi (uskoki, silne zafałdowania, wymycia złoża i inne) lub też zaszłości eksploatacyjnych (resztki, krawędzie, zroby, nadmierne rozcięcie pokładu i inne). Ich energie są na ogół znacznie wyższe niż energie wstrząsów powtarzalnych. Trzecim typem są wstrząsy regionalne, występujące w miejscach zaburzeń tektonicznych,

* AGH w Krakowie

których ogniska są zlokalizowane głębiej niż w dwóch poprzednich przypadkach. Mogą one być wywołane deformacją warstw aktywnych sejsmicznie w rezultacie aktualnie prowadzonej eksploatacji lub ruchami neotektonicznymi.

Podsumowując, nierzadko spotykaną sytuacją jest generowanie zjawisk o podobnych mechanizmach źródła i o bardzo zbliżonej lokalizacji, które różnią się jedynie energią i czasem, w którym zostały wygenerowane. Zjawiska te z uwagi na podobny mechanizm w źródle i zbliżoną drogę propagacji będą cechować się podobnym kształtem obrazów falowych rejestrowanych na poszczególnych czujnikach. Są one nazywane są multipletami [4], [2]. Identyfikacja multipletów w rejestrowanej populacji sygnałów sejsmicznych jest realizowana w procesie klasteryzacji.

Klasteryzacja (analiza skupień) jest to proces grupowania obiektów w klasy o podobnych cechach. Jeżeli dwa sygnały sejsmiczne cechują się wysoką koherencją (co jest równoznaczne z podobnym obrazem falowym sygnału) można, jak to stwierdzono powyżej, wnioskować, że źródła tych sygnałów leżą w niewielkiej odległości oraz mechanizm zjawiska generującego te sygnały jest bardzo podobny.

Poniżej przedstawiono opis algorytmu automatycznej detekcji multipletów realizowaną w procesie klasteryzacji. Zaproponowano procedurę uśredniającą obwiednię sygnału, a także parametry charakteryzujące jego kształt, będące podstawą do identyfikacji sygnałów podobnych. W kolejnych rozdziałach zaprezentowano przykład klasteryzacji sygnałów zarejestrowanych w kopalni miedzi „Rudna” oraz omówiono potencjalne możliwości wykorzystania zidentyfikowanych multipletów do analizy procesów dynamicznych w górotworze.

2. Algorytm automatycznej detekcji multipletów

Sygnały sejsmiczne rejestrowane podziemną siecią sejsmiczną mogą mieć skomplikowany, interferencyjny charakter. Obraz falowy zawiera nałożone na siebie składowe generowane w źródle wstrząsu oraz wszystkie mody przemienne (odbite i załamane) generowane w trakcie propagacji w ośrodku niejednorodnym. Kształt rejestrowanego sygnału

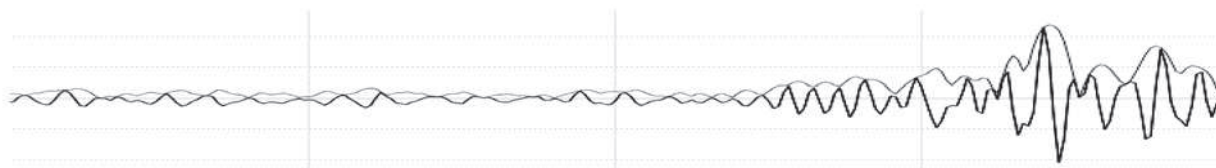
zależy od drogi propagacji i mechanizmu źródła. Dominujące znaczenie ma tutaj rozkład współczynników odbicia na trasie sygnału (zarejestrowany sygnał jest splotem rozkładu współczynników odbicia oraz impulsu powstałego w źródle).

Stopień podobieństwa sygnałów określane będzie na podstawie ich obwiedni. Obwiednia jest liczona jako amplituda zespolonej reprezentacji sygnału $x(t)$

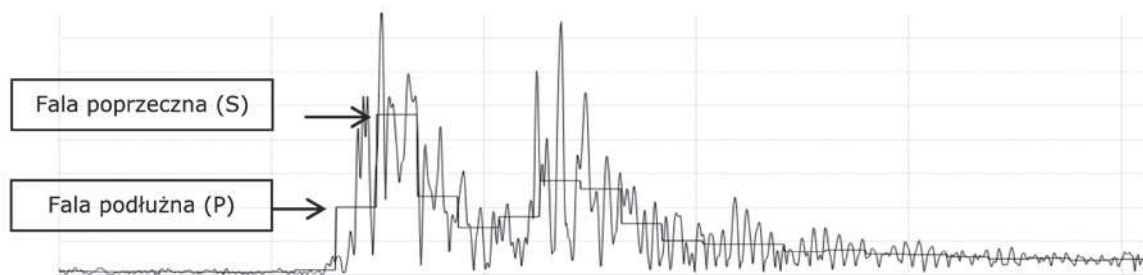
$$\bar{x}(t) = \sqrt{x(t) + \hat{x}(t)} \quad (1)$$

gdzie $\hat{x}(t)$ jest transformacją Hilberta sygnału $x(t)$. Fragment sygnału wraz z jego obwiednią przedstawiono na rys. 1. Zarówno zarejestrowany sygnał, jak i jego obwiednia mają z reguły skomplikowany kształt, cechujący się dużą ilością detali o cechach, które można uznać za losowy z uwagi na charakter procesów, które go generują. By prowadzić efektywne porównywanie kształtów sygnału konieczne jest usunięcie mniej istotnych szczegółów i kompresja informacji zawartej w obwiedni sygnału. Do kompresji obwiedni sygnału wykonywane jest uśrednianie w blokach o stałej szerokości. W wyniku tej operacji otrzymujemy dla każdego sygnału ciąg danych składający się z takiej samej ilości próbek. Na rys. 2 znajduje się przykładowy wynik uśredniania.

Dotychczasowe doświadczenia w zakresie identyfikacji multipletów pokazały, że bardzo trudno jest zdefiniować mały zbiór parametrów w sposób jednoznaczny charakteryzujący obwiednię. Zadanie jest tym trudniejsze, gdyż parametry muszą być wyznaczone w sposób automatyczny. W ramach prezentowanej pracy zaproponowano użycie trzech parametrów. Pierwszym parametrem używanym do określania podobieństwa rejestrowanych zjawisk jest stosunek amplitud fali poprzecznej do podłużnej. Przyjmujemy, że fala poprzeczna to maksimum skompresowanej obwiedni (choć w wielu wypadkach to duże uproszczenie). Z kolei fala podłużna jako pierwsza wartość większa od poziomu szumów (przykładowe lokalizacje fali podłużnej oraz poprzecznej przedstawione są na rys. 2). Drugim parametrem wykorzystywanym do określania podobieństwa zjawisk jest odległość między binarnie kodowanymi obwiedniami. Sekwencję rozpoczynamy od zera.



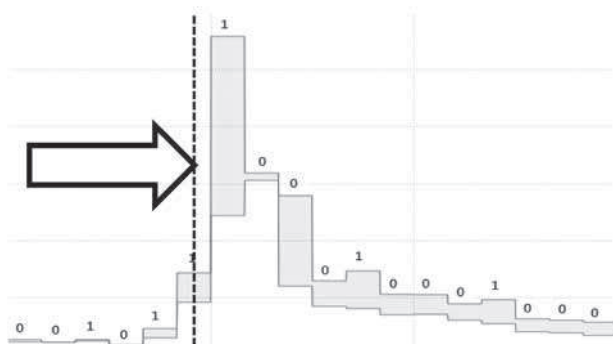
Rys. 1. Zarejestrowany sygnał sejsmiczny wraz z obwiednią
Fig. 1. Recorded seismic signal and its envelope



Rys. 2. Obwiednia i uśredniona obwiednia sygnału z zaznaczonymi amplitudami fali podłużnej i poprzecznej
Fig. 2. Envelope and averaged envelope of the signal with depicted amplitudes of longitudinal and shear waves

Następnie przypisujemy 1, jeśli kolejna wartość jest większa lub 0, jeżeli nie. Przykład przedstawiono na rys. 3. Kod binarny tego typu jest czuły na zmiany odległości P-S oraz istnienie silnych fal wtórnych. Odległość jest wagowana pozycją k w ciągu binarnym (waga $w_k \sim 1/k$), tak by początek ciągu miał największe wagi a koniec najmniejsze. Trzeci parametr to różnica między unormowanymi wartościami uproszczonej obwiedni. Różnica pomiędzy dwoma obwiedniami jest nieczuła na niewielkie przesunięcia czasowe poszczególnych składowych sygnału.

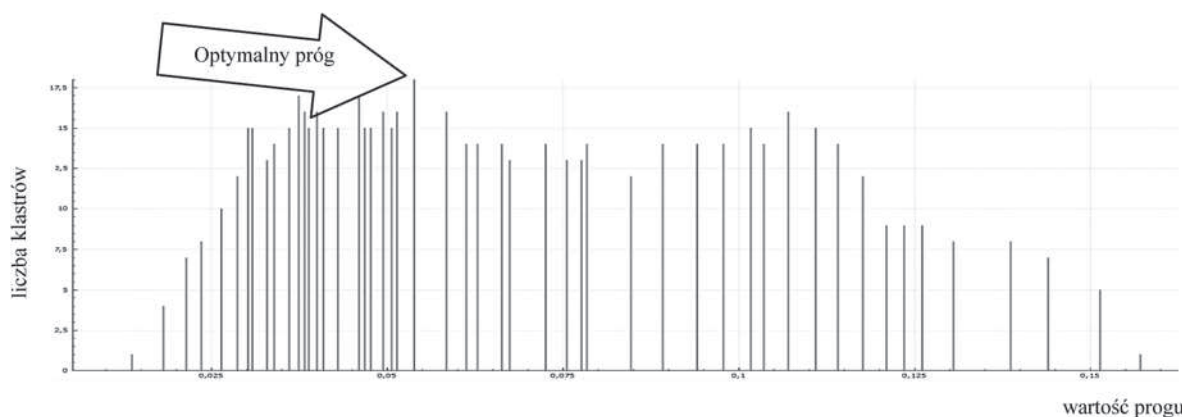
Drugi i trzeci parametr obliczane są jako ważona suma, poczynając od momentu rejestracji fali podłużnej. Zdarzenia muszą być tak przesunięte, aby początek sygnału był w tym samym punkcie (np. przesuwamy sygnał, tak aby nadejście fali podłużnej było w zerze, w miejsce brakujących wartości możemy wpisać ostatnią wartość).



Rys. 3. Binarna sekwencja uśrednionej obwiedni
Fig. 3. Binary sequence of the averaged envelope

Obliczanie całkowitej odległości rozpoczynamy od wyznaczenia wartości każdego ze zdefiniowanych parametrów. Następnie normalizujemy otrzymane wartości, tak aby przyjmowały wartości z zakresu $[0,1]$. Dzięki wykonaniu normalizacji, wszystkie miary będą stanowić taki sam wkład do całkowitej odległości.

Procedura klasteryzacji będzie się składać z dwóch etapów. Pierwszy etap to wyznaczenie tzw. ciągów uczących, pozwalający zredukować procedurę rozpoznawania klastrów bez nauczyciela do rozpoznawania z nauczycielem (wzorcem). Drugi etap to właściwa klasteryzacja realizowana na drodze grupowania wg kryterium minimalnej odległości.

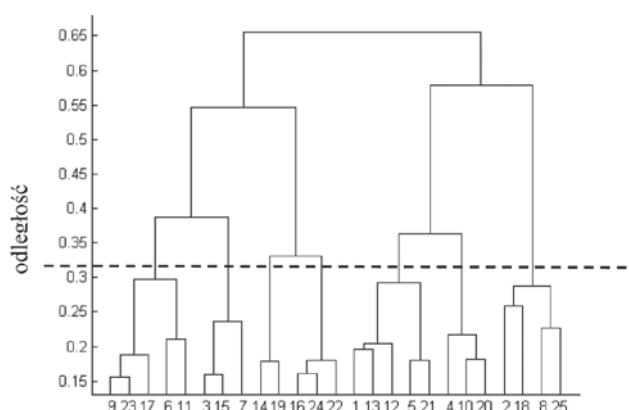


Rys. 5. Histogram przedstawiający zależność liczby utworzonych klastrów przy danej wielkości progu w metodzie pojedynczych wiązań

Fig. 5. Number of clusters created for particular thresholds in the single link method in a form of a histogram

Pierwszy etap procedury jest realizowany z użyciem metody pojedynczych wiązań. Jest to hierarchiczny algorytm klasteryzacji. Jego działanie polega na systematycznym łączeniu klastrów, aż do pewnego momentu, określonego progiem klasteryzacji. Działanie algorytmu pojedynczych wiązań jest ilustrowane z wykorzystaniem tzw. dendrogramu (rys.4). Działanie można streścić w kilku krokach:

1. Dla każdego zjawiska (jego numer jest umieszczony na osi poziomej rys.4) tworzone są jednoelementowe klastry.
2. Wyznaczamy dwa klastry, których odległość jest najmniejsza. Odległość definiujemy jako najmniejszą odległość między elementami z klastra.
3. Jeżeli odległość między wyznaczonymi zbiorami jest większa od zadanego progu, kończymy obliczenia (przykładowy próg zaznaczono przerywaną linią na rys. 4).
4. Łączymy wyznaczoną parę klastrów i ponownie wykonujemy krok nr. 2



Rys. 4. Dendrogram z zaznaczonym progiem klasteryzacji
Fig. 4. Dendrogram and the clusterization threshold

Przed wykonaniem opisywanego algorytmu należy wyznaczyć optymalny próg. Naszym celem jest wyznaczenie takiego progu dla metody pojedynczych wiązań, aby liczba klastrów była jak największa, a jednocześnie próg możliwie niski. Aby móc to zrobić trzeba najpierw obliczyć histogram przedstawiający zależność liczby klastrów od przyjętego progu klasteryzacji, a następnie wybrać wartość progu, w której występuje maksimum. Rys. 5 przedstawia przykładowy histogram z zaznaczonym optymalnym progiem.

Histogram jest wyznaczany przy użyciu algorytmu pojedynczych wiązań. W każdym kroku po połączeniu kolejnych klastrów zapisujemy wartość odległości, przy której zostały one połączone oraz liczbę klastrów o rozmiarze większym niż 1.

Po wyznaczeniu klastrów przy użyciu odpowiedniego progu wydzielimy z nich załączki grup (tzw. wzorce) do klasteryzacji. Aby zdefiniować prawidłowo wzorec w każdej klasie wybiera się element z maksymalną liczbą połączeń. Element ten wraz z elementami z nim połączonymi tworzy pierwszy wzorec. Drugi wzorec to element o maksymalnej liczbie połączeń niepołączony z pierwszym wzorcem. Operacja tworzenia wzorców jest powtarzana aż do wyczerpania się elementów danej klasy o liczbie połączeń dwa lub większej.

Ostatnim krokiem algorytmu jest grupowanie typu NN (ang. *nearest neighbour*) przy użyciu zbioru uczącego określonego uprzednio. Powyższa metoda grupowania została użyta ze względu na konieczność zachowania dużego podobieństwa pomiędzy elementami tej samej grupy. W pierwszym kroku dla wybranego wzorca algorytm dołącza wszystkie elementy populacji odległe mniej niż wartość progowa od jednego z elementów wzorca. W następnym kroku wartość progowa jest dzielona na pół i dla niej cała operacja jest powtarzana. W trzecim kroku po raz kolejny odległość progowa jest połowiona i dołączane są nowe elementy populacji na zasadzie identycznej jak poprzednio. Operacja jest powtarzana do momentu aż żaden nowy element nie jest dołączany do pliku. Oczekuje się, że proces ulega przerwaniu po wykonaniu trzech lub czterech kroków.

3. Przykład praktyczny

Opisana procedura lokalizacji została zaproponowana przez autora [4], jak również program komputerowy, za po-

mością którego wykonano zaprezentowane przykłady, jest programem autorskim (język Fortran 90). Pierwsze zastosowania dotyczyły detekcji multipletów w strumieniu emisji sejsmoakustycznej rejestrowanej na polach geotermalnych w procesie hydroszczelinowania górotworu. Warunki eksperymentu, sposób pomiaru i charakter zjawisk w sposób znaczny różniły się od warunków w kopalniach podziemnych. Interesująca stąd wydała się idea, by sprawdzić rezultaty jakie opisana procedura daje w przypadku rejestracji emisji sejsmicznej w kopalniach podziemnych.

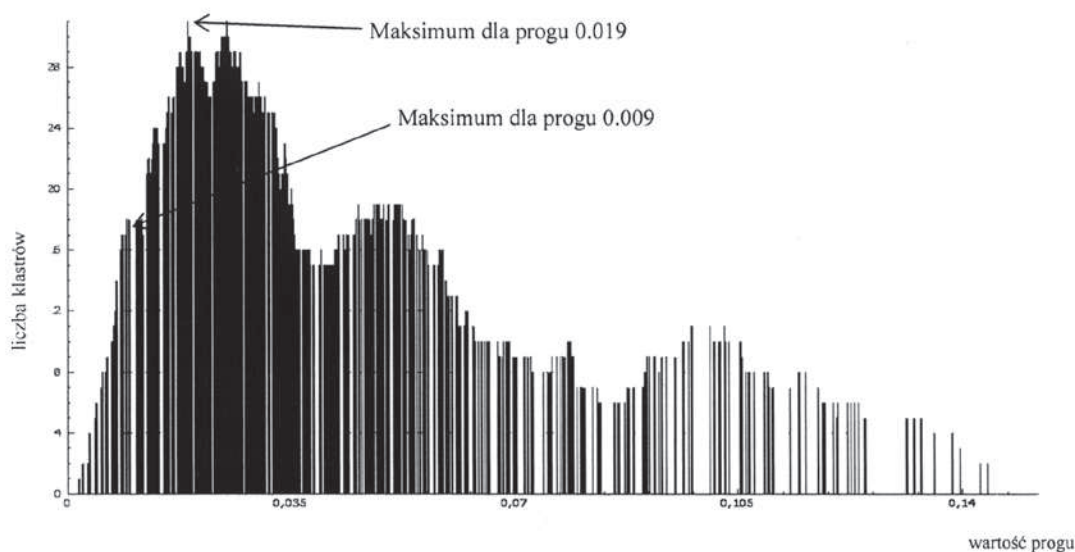
Przeprowadzono analizę rejestracji sejsmicznych pochodzących w kopalni „Rudna” LGOM z miesiąca stycznia 2011 roku. W ciągu tego miesiąca zarejestrowano łącznie 2687 zjawisk sejsmicznych. Do przykładowej analizy wybrano wstrząsy zarejestrowane w pierwszym kanale aparatury sejsmicznej. Przed przystąpieniem do klasteryzacji sprawdzono dane pod względem poprawności. Sprawdzane są, między innymi, stosunek maksymalnej amplitudy do poziomu szumów (przyjęto że odrzucane będą wstrząsy o stosunku mniejszym niż 4) oraz czy sygnał nie został zbyt obcięty w czasie (wystąpienie fali P nie może być w pierwszej próbie oraz koniec sygnału w ostatniej) lub czy jego amplituda nie została zdeformowana (zjawisko potocznie nazywane przesterowaniem). Po sprawdzeniu powyższych warunków do dalszej analizy pozostały 554 wstrząsy.

Poszczególne parametry w tak utworzonej populacji posiadały zakresy przedstawione w tab. 1. W ostatniej kolumnie przedstawione są minimum i maksimum dla całkowitej odległości (wartość minimum jest różna od zera ponieważ, nie uwzględniono tutaj zerowej odległości między tymi samymi zjawiskami).

Następnym krokiem było wyznaczenie histogramu, na podstawie którego został określony próg klasteryzacji. Histogram wraz z wybranymi progami, które były analizowane przedstawiono na rys. 6.

Tablica 1. Zakresy poszczególnych parametrów
Table 1. Range of particular parameters

	Stosunek S/P	Kodowana obwódnia	Wartości obwódni	Całkowita odległość
Minimum	0	0	0	0.00175408
Maksimum	62.081	7.15679	6.09698	1.196191



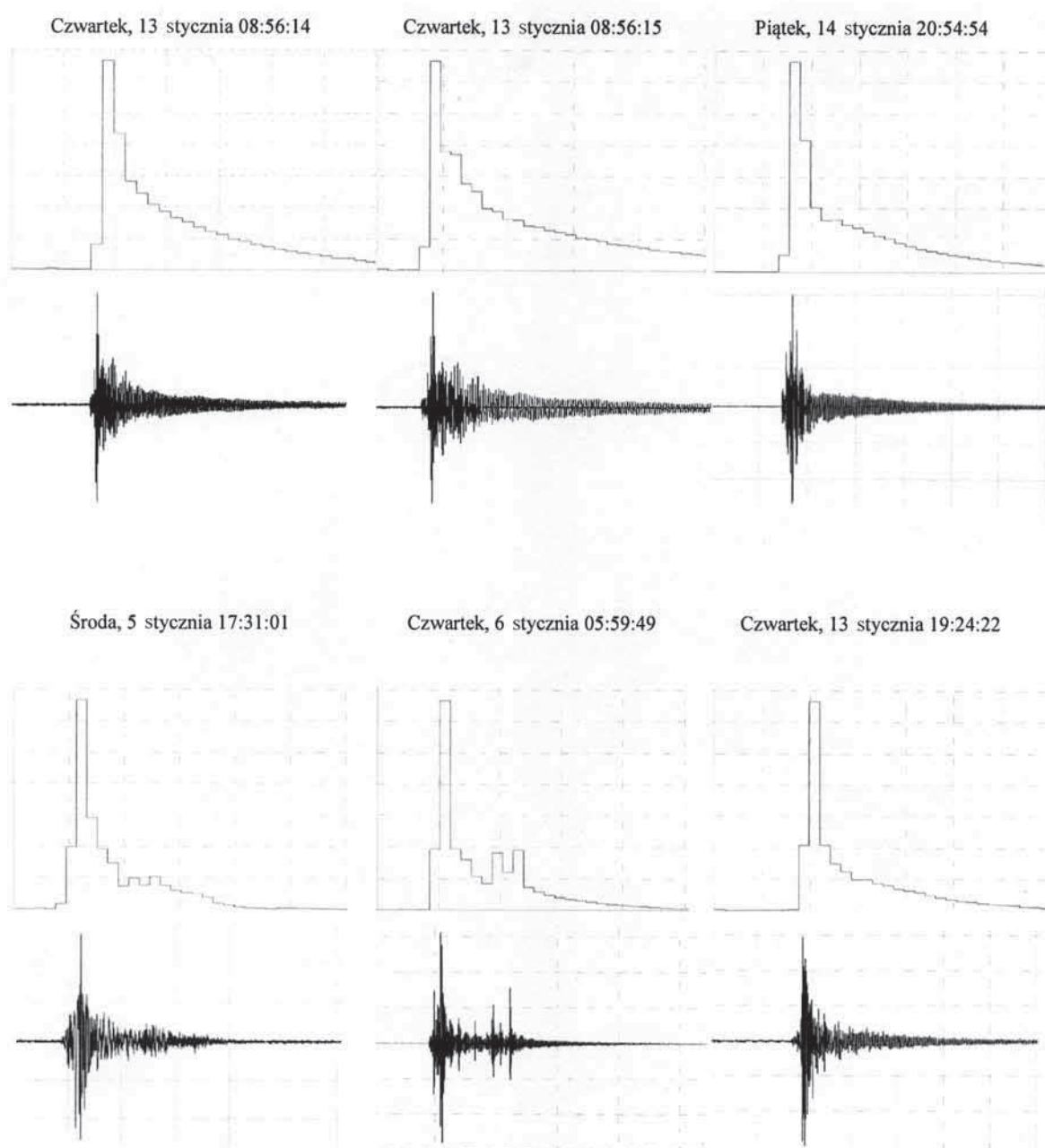
Rys. 6. Histogram otrzymany dla badanych zjawisk sejsmicznych
Fig. 6. Histogram developed for the tested population of seismic events

Dla progu wybranego automatycznie w miejscu wystąpienia maksimum histogramu algorytm wyznaczył 22 klastry. Ilość zdarzeń w klastrach wahała się od 3 do 23. Część zdarzeń została przypisana do więcej niż jednego klastra. Oznaczało to, że wybrany próg był zbyt duży.

Analizę powtórzono dla mniejszego progu wynoszącego 0.009. Próg ten odpowiada lokalizacji pierwszego względnego maksimum na histogramie (rys. 6). W wyniku otrzymano 6 klastrów o rozmiarze od 3 do 14. Przykładowe sygnały dla dwóch otrzymanych klastrów przedstawiono na rys. 7. Najbardziej podobne są początki zdarzeń. Pojawiające się zróżnicowanie w dalszych wartościach poszczególnych sygnałów wynika z zastosowania wagowania przy liczeniu wzajemnej odległości pomiędzy sygnałami.

Analizę można także przeprowadzić dla większej liczby kanałów. Multiptyety, jako zjawiska posiadające ten sam

mechanizm źródła i generowane blisko siebie powinny cechować się zbliżonymi zapisami w poszczególnych kanałach. W związku z tym procedura klasteryzacji powinna w takim przypadku do pewnego momentu przebiegać niezależnie w każdym kanale. Dla każdego kanału niezależnie należy wyznaczyć próg odcięcia. Następnie wybrać największy z wyznaczonych progów, by otrzymać jak najobszerniejsze grupy sygnałów podobnych dla każdego kanału. Następnie szukamy części wspólnej dla klastrów utworzonych w różnych kanałach (iloczynu zbiorów zdarzeń). Wynik będzie klastrem sygnałów podobnych we wszystkich kanałach. Jak wynika z przeprowadzonych analiz, zbiór ten zawiera znacznie mniej zjawisk niż zbiory (klastry) utworzone w poszczególnych kanałach. Procedurę można osłabić (powiększyć wynikowy klasterek), dopuszczając, by zaliczać do wynikowego klastra sygnały zgrupowane nie we wszystkich, ale jedynie w większości



Rys. 7. Przykładowe sygnały i ich uproszczone obwiednie z dwóch klastrów zidentyfikowanych dla progu 0.009
 Fig. 7. Exemplary signals and their simplified envelopes picked up from two clusters for threshold 0.009

kanałów – np. we wszystkich bez jednego lub dwóch kanałów). Na przykład dla przypadku zbioru opisanego poprzednio przy wybranych trzech pierwszych kanałach dla danych ze stycznia 2011 poziom odcięcia był największy dla kanału 3 i wynosił 0.025. Otrzymano wówczas 6 klastrów. Populacje te zawierają odpowiednio: 14, 15, 9, 18, 8, oraz 6 zjawisk.

Zgodnie z oczekiwaniami wyniki grupowania nie zależą od tego czy znany jest moment wejścia fali P, czy też jest on estymowany z obwiedni uśrednionej. Jak to sprawdzono w większości przypadków zjawiska zakwalifikowane do tej samej grupy miały wysoką koherencję. Z drugiej strony zjawiska o małej koherencji nie zostały zakwalifikowane do tej samej grupy. Ponadto przeprowadzona lokalizacja zjawisk pochodzących z jednego klastra potwierdziła, że automatycznie sklasyfikowane zjawiska mają bardzo zbliżoną lokalizację.

4. Dyskusja

Rutynowe działania służb kopalnianych obejmują rejestrację, interpretację i archiwizację zjawisk sejsmicznych w szerokim zakresie energii. Współczesne, kopalniane sieci sejsmiczne są złożone nierzadko z kilkudziesięciu czujników prowadzących rejestrację w różnych zakresach częstotliwości i energii. Jeśli rejestrowana jest emisja niskoenergetyczna, począwszy od pasma sejsmoakustycznego, niejednokrotnie zachodzi potrzeba archiwizacji kilkuset sygnałów na dobę. Powszechną praktyką jest archiwizacja danych w katalogach dziennych na dyskach komputerów obsługujących aparaturę sejsmiczną bądź sejsmoakustyczną, a po pewnym czasie usuwanie rejestracji z dysków komputerów i ich archiwizacja na nośnikach zewnętrznych. Interpretacja emisji sprowadza się najczęściej do obliczania aktywności emisji sejsmicznej, ewentualnie wyznaczania sumarycznej energii emitowanej przez górotwór i lokalizacji najsilniejszych wstrząsów. Jedynie sporadycznie prowadzona jest bardziej zaawansowana analiza statystyczna, na przykład polegająca na estymacji funkcji ryzyka sejsmicznego [1].

Zarówno lokalizacja źródeł emisji, jak i estymacja funkcji ryzyka sejsmicznego mogą być prowadzone dla pełnej populacji rejestrowanych sygnałów i jedynym kryterium dopuszczającym może tu być ich wystarczająca jakość zapisu. Innymi słowy parametry poszczególnych zjawisk, jak i całego strumienia mogą być liczone niezależnie od innych zjawisk. Osiąga się wtedy globalny opis sytuacji panującej w dużym obszarze górotworu.

Możliwe jest też podejście zaproponowane w niniejszym artykule – można rzec – bardziej lokalne, polegające na obliczaniu parametrów względnych. W tym przypadku należy prowadzić klasteryzację sygnałów w multiplety, by uzyskać grupy sygnałów o wysokiej koherencji wzajemnej. Analiza słabego strumienia emisji oparta na analizie multipletów prowadzi do bardzo dokładnej, względnej lokalizacji źródeł emisji. Analizując wzrost liczebności poszczególnych multipletów w czasie, jest możliwe określenie przybliżonego ryzyka wystąpienia zjawisk dynamicznych. Powyższa idea została przedstawiona w [5].

Klasteryzacja prowadzona w sposób automatyczny w czasie rzeczywistym może przyczynić się do znacznie bardziej efektywnej archiwizacji rejestracji sejsmicznych. Prócz tworzenia ogólnych archiwów dziennych całego strumienia emisji można na bieżąco tworzyć subkatalogi, z których każdy będzie zawierał sygnały wzajemnie podobne – multiplety. Tym samym już na etapie archiwizacji można będzie dokonywać wstępnej oceny procesów zachodzących w górotworze.

Innym bezpośrednim zastosowaniem wyodrębnionych multipletów jest bardzo dokładna lokalizacja zjawisk sejsmicznych

wchodzących w jego skład. We względnej lokalizacji multipletów wybieramy na wstępie zjawisko odniesienia, do którego będziemy odnosili położenie pozostałych zjawisk. Relokalizacji ulegają tylko zjawiska należące do tego samego multipletu. Dla zjawisk oblicza się różnicę czasową Δt_i , $i=1, \dots, N-1$ (N – liczba zjawisk w multiplecie) względem zjawiska odniesienia (reperu), wykorzystując czasowo-częstotliwościową funkcję widma wzajemnego:

$$\begin{aligned} S_{xy}(f) &= K_{xy}(f) - jQ_{xy}(f) \\ \psi(f) &= \tan^{-1} \left(\frac{Q_{xy}(f)}{K_{xy}(f)} \right) \\ \Delta t(f) &= \frac{\psi(f)}{2\pi f} \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie $S_{xy}(f)$, $K_{xy}(f)$, $Q_{xy}(f)$ to obliczane w oknie czasowym kolejno: widmo wzajemne, jego część rzeczywista i rojona, zaś $\psi(f)$ i $\Delta t(f)$ wzajemne widmo fazowe i różnica czasowa między zjawiskami (jest ona funkcją częstotliwości). Obliczane są ponadto różnice kątów inklinacji i azymutu ΔI_i , ΔA_i , $i=1, \dots, N-1$. Następnie lokalizacja hipocentrow ulega takiej zmianie, by zminimalizować sumaryczną normę błędów lokalizacji. Przykłady relokalizacji oparte na tej metodzie alternatywnie są niejednokrotnie wykorzystywane w wypadku interpretacji emisji sejsmicznej [7].

Metoda jest stabilna, mniej czasochłonna i bardziej efektywna niż inne metody lokalizacji względnej zjawisk sejsmicznych (jak metoda JHD lub „double difference location technique” - [8]), gdyż dotyczy relokalizacji mniejszych grup zjawisk w ramach ściśle zdefiniowanych klastrów. Tym samym metoda relokalizacji multipletów może okazać się bardziej efektywna w przypadku lokalizacji prowadzonej w obszarach o niskiej aktywności. Może ona umożliwić obserwację rozwoju pojedynczej szczeliny, prowadzącej do wzrostu zagrożenia dużym wstrząsem.

5. Podsumowanie

Identyfikacja multipletów w populacji rejestrowanych sygnałów wspomaga inne metody służące do bieżącej identyfikacji procesów dynamicznych w górotworze. Zidentyfikowane multiplety pozwalają, jak to pokazują źródła literaturowe, na dokładną lokalizację źródeł emisji związanych z aktywną nieciągłością, wzdłuż której emitowane są zjawiska podobne, najczęściej o mechanizmie ścinającym. Metoda lokalizacji działa bardzo szybko i efektywnie, gdyż jest ograniczona do zjawisk (stosunkowo nielicznych) w obrębie pojedynczego multipletu. W porównaniu do innych metod lokalizacji względnej posługuje się różnicami czasów i kierunków wyznaczanymi ze zjawisk o bardzo dużej koherencji, co zmniejsza błąd lokalizacji. Pozwala również na wstępną selekcję istotnych zjawisk sejsmicznych, wymagających archiwizacji, w odróżnieniu od emisji sejsmicznej o całkowicie losowym charakterze. Metoda klasteryzacji opartej ma multipletach, mimo iż prosta, jest bardzo rzadko stosowana w praktyce kopalnianej, tymczasem korzyści jakie może przynieść są bardzo wymierne.

Prac realizowana w ramach badań statutowych nr 11.11.140.032 wydziału GGiOŚ AGH.

Literatura

1. Cianciara A., Cianciara B.: Method of predicting tremors on the basis of seismic emission registered in exploitation workings, Tectonophysics,

2008. vol. 456 s. 62–66.
2. Felzer, K. R., Abercrombie, R. E., Ekstrom G.: A Common Origin for Aftershocks, Foreshocks, and Multiplets, Bull. Seism. Soc. Am., 2004. Vol. 94, No. 1, s. 88–98.
3. Konopko, W.: Wieloźródłowość wstrząsów górotworu, w Mat. Symp. „Zagrożenia naturalne w górnictwie”, Warsztaty 2009, s. 97-103.
4. Leśniak, A., Niitsuma, H.: Clustering similar AE events using the filtered waveform envelope. 1996, Proc. of 13th International Acoustic Emission Symposium, Nara, Japan. s.133-140.
5. Moriya, H., Niitsuma, H., Baria, R.: Multiplet-clustering Analysis Reveals Structural Details within Seismic Cloud at the Soultz Geothermal Field, France, Bull. Seism. Soc. Am., 2003, Vol.93, No. 4, s. 1606-1620.
6. Orlecka-Sikora B., Lasocki S.: Clustered structure of seismicity from the Legnica-Głogów copper district, Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. 2003, M-24(340), s.104-119.
7. Philips, W. S., House L. S., Fehler M. C.: Detailed joint structure in a geothermal reservoir from studies if induced microearthquake clusters, J.Geophys. Res. 1997, 102, s. 11745-11763.
8. Rudziński, L., Dębski, W.: Extending the double-difference location technique to mining applications, Part I: Numerical Study, Acta Geophysica, 2011, vol. 59, no. 4, s. 785-814.
9. Stec, K.: Mechanizm ogniska wstrząsu i metody jego wyznaczenia, w Mat. Symp. „Zagrożenia naturalne w górnictwie”, Warsztaty 2009, p. 287-305.

Przypominamy!

Na łamach Przeglądu Górniczego trwa **KONKURS O NAGRODĘ IMIENIA PROFESORA BOLESŁAWA KRUPIŃSKIEGO**

na

*najlepszy artykuł upowszechniający doświadczenia Kopalń
podziemnych w zakresie działań skutkujących poprawą
bezpieczeństwa górnictwa i ekonomicznej efektywności
eksploatacji złóż.*

Doświadczenia, które gromadzą się w kopalniach są istotnym źródłem wiedzy
i postępu. Dzielimy się swymi doświadczeniami!

