

Łukasz KORTAS

Główny Instytut Górnictwa, Katowice

Przejawy chaosu deterministycznego w sejsmiczności indukowanej

Streszczenie

Zbiory zjawisk sejsmicznych związanych z eksploatacją miedzi w LGOM, węgla kamiennego w dwóch kopalniach GZW i złota w Republice Południowej Afryki przebadano pod kątem obecności dynamiki nieliniowej i chaosu deterministycznego. Poszczególne zbiory różniły się zakresem rejestrowanych energii od $10^2 - 10^6$ J po $10^5 - 10^{11}$ J co świadczy o odmienności skali obserwowanych procesów pęknięcia i niszczenia skał. Analizowano cztery charakterystyczne deskryptory: uogólniony wymiar fraktalny, najmniejszy wymiar przestrzeni fazowej, wymiar zrekonstruowanego atraktora procesu oraz największy wykładnik Lyapunova. Obliczenia wykonano dla: rozkładów czasowo-przestrzennego i energetycznego wstrząsów. Okazało się że dla wszystkich zestawów danych rozkłady analizowanych parametrów zjawisk sejsmicznych miały strukturę fraktalną lub multifraktalną a badane parametry dynamiki chaotycznej mogą być stosowane do opisu procesów sejsmicznych bez względu na genezę i skalę tych zjawisk. Potwierdzono możliwość zastosowania wykorzystanych metod badania danych do opisu procesów sejsmiczności indukowanej eksploatacją górnictwem. Na podstawie analizy parametrów dynamiki nieliniowej, uzyskano pewne, jakościowe rozdzielanie badanych procesów sejsmicznych. W niektórych przypadkach została potwierdzona obecność zachowań chaotycznych w układach.

1. Wstęp

Procesy sejsmiczności indukowanej rozważane są w tej pracy jako złożone układy dynamiczne, które mogą wykazywać pewne przejawy chaosu deterministycznego. Do badania i opisu zachowań chaotycznych w układach fizycznych służy wiele pojęć i konstrukcji matematycznych. Poniżej do opisu różnoskalowej sejsmiczności wykorzystane zostaną: uogólniony wymiar fraktalny, przestrzeń fazowa, największy wykładnik Lyapunova, atraktor i jego wymiar, szeregi czasowe. Pojęcia te mogą znaleźć zastosowanie w opisie dynamiki procesów sejsmicznych.

Analiza łącząca różną genezę i skalę zjawisk sejsmicznych obserwowanych w kopalniach stwarza okazję przetestowania możliwości opisowych i szerszego zastosowania parametrów procesów pęknięcia i niszczenia skał w różnych warunkach. Badanie parametrów charakteryzujących sejsmiczność indukowaną ma istotne znaczenie z punktu widzenia zapewnienia bezpieczeństwa zamieszkałych stref sejsmicznych czy prowadzenia prac górniczych będąc jednocześnie interesującym zagadnieniem poznawczym. Wykorzystanie parametrów dynamiki nieliniowej jest jedną z dróg opisu zmienności rozwoju procesów wstrząsotwórczych. Ponieważ rozkłady energii, lokalizacji i czasów wystąpienia wstrząsów wykazują cechy samopodobieństwa statystycznego takimi parametrami mogą być uogólnione wymiary

fraktalne rozkładów tych wielkości. W badaniach dynamiki procesów sejsmicznych pomocna jest analiza ich przestrzeni fazowych i określenie wymiaru korelacyjnego atraktora. Parametrami charakteryzującymi rozwój procesu sejsmicznego i wrażliwość na zaburzenia warunków brzegowych są także wykładniki Lyapunova.

2. Metodyka badań

Analizowano widmo uogólnionego wymiaru fraktalnego aby zbadać czy zdarzenia sejsmiczne zapisane w poszczególnych zbiorach danych reprezentują zbiory fraktalne dla rozkładów energii, czasu i współrzędnych źródeł. Uogólniony wymiar fraktalny estymowany był przy pomocy sumy korelacyjnej (Grasberger i Proccacia 1983). Statystyczny moment rzędu q sumy korelacyjnej wynosi:

$$C(R, q) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{N} \sum_{j \neq i} H(R - \|x_i - x_j\|) \right]^{q-1} \quad (2.1)$$

gdzie:

x_i, x_j – dowolne różne elementy zbioru danych,

N – liczba tych elementów,

$H(y)$ – funkcja Heaviside'a przybierającą wartości 1, gdy $y \geq 0$ i 0 gdy $y < 0$.

Funkcja Heaviside'a dolicza do sumy korelacyjnej tylko te punkty, które znajdują się w odległości mniejszej lub równej R od punktu x_i . Jeśli rozkład pewnej wielkości fizycznej ma cechy multifraktalne $C(R, q)$ jest liniowo zależna od q w skali dwulogarytmicznej.

$$C(R, q) \propto (q-1)D_q \log R \quad (2.2)$$

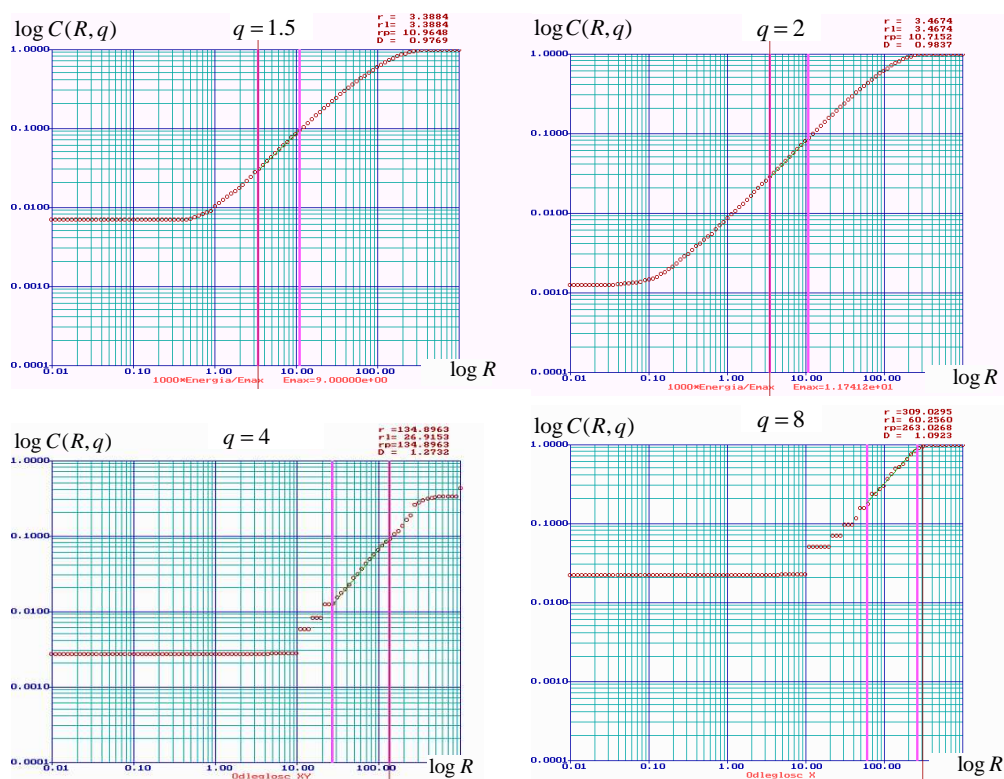
gdzie:

$C(R, q)$ – uogólniona suma korelacyjna,

D_q – estymata wymiaru uogólnionego.

Wartość D_q szacowano z nachylenia krzywej (2.2) zależności sumy korelacyjnej od wartości R zarówno dla różnych wartości parametru q ($q \neq 1$). Nachylenie obliczane było z wybranego przedziału $[R_1, R_2]$ gdzie zależność ta była liniowa. Przy tego typu obliczeniach konieczna jest ingerencja interpretatora w wyborze przedziału liniowości, co z kolei wymaga jego decyzji opartych na wizualizacji otrzymanych dotychczas wyników. Rysunek 2.1 przedstawia przykładowe zależności sumy korelacyjnej od miary R dla różnych wartości q oraz wybory zakresu liniowości.

Aby poznać dynamikę procesu badano przestrzeń fazową rozpatrywanych zjawisk sejsmicznych. Nie znając postaci równań opisujących tę dynamikę, analiza miała dostarczyć danych o wymiarach przestrzeni a tym samym o najmniejszej liczbie niezależnych zmiennych opisujących proces i o atraktorach procesu. W przypadku gdy pełny opis stanu układu jest nieosiągalny, co ma miejsce m.in. dla sejsmiczności indukowanej analizuje się pojedynczy ciąg kolejnych wartości jednej ze zmiennych dynamicznych układu (np. wartości energii kolejnych następujących po sobie zdarzeń sejsmicznych). Tworzy się szeregi „czasowe” taktowane kolejnością rejestracji wybranych parametrów zdarzeń sejsmicznych w czasie. Utworzono ‘szeregi czasowe’ czasu wystąpienia zdarzenia, epicentrum źródła xy oraz energii wstrząsu.



Rys. 2.1. Przykładowe zależności $\log C(R, q)$ od $\log(R)$ dla $q = 1,5; 2; 4$ i 8 otrzymane dla 1870 wstrząsów zarejestrowanych w Kopalni Miedzi „Polkowice-Sieroszowice”

Fig. 2.1. Samples of $\log C(R, q)$ vs $\log(R)$ relations for $q = 1,5; 2; 4$ i 8 obtained for 1870 tremors recorded in „Polkowice-Sieroszowice” copper mine

Zgodnie z twierdzeniem Takensa wybór zmiennej, z której szeregu czasowego rekonstruuje się przestrzeń fazową nie ma znaczenia a użycie pojedynczego szeregu czasowego jednej zmiennej jest uzasadnionym uogólnieniem, gdyż na taki szereg mają wpływ wszystkie inne zmienne dynamiczne badanego układu (Takens 1981). Analizuje się przestrzenie zanurzone utworzone ze zbioru obserwacji szeregu czasowego $\omega(t)$ jakiejś skalarnej wielkości (tu: energia, czas, położenie xy epicentrów). Tworzone są w d -wymiarowych przestrzeniach euklidesowych wektory $\bar{y}(t)$ o składowych będących wartościami obserwacji z opóźnieniem czasowym τ (Baker i Golloub 1998):

$$\bar{y}(t) = \{\omega(t), \omega(t + \tau), \omega(t + 2\tau), \dots, \omega(t + [d - 1]\tau)\} \quad (2.3)$$

gdzie:

$\omega(t)$ – zmienna układu,

τ – opóźnienie czasowe.

Istnieją różne kryteria wyboru czasu opóźnienia, tu za Mortimer (1997) i Radu i in. (1997) czas opóźnienia przyjmowany jest jako pierwsze zero funkcji autokorelacji. Poniżej przedstawiony jest przykład sposobu tworzenia z danych pomiarowych wektorów

\bar{y} w kolejnych przestrzeniach Euklidesowych o wzrastającym wymiarze d . Niech $\{E_i\}$, $i=1,\dots,n$ oznacza zbiór danych energii kolejnych rejestrowanych zdarzeń sejsmicznych. Przyjmując przykładowe opóźnienie czasowe $\tau=5$ odpowiednie wektory mają następującą postać:

$$\begin{aligned} \text{dla } d = 2, \quad \bar{y} &= \{[E_1, E_6], [E_2, E_7], \dots, [E_{n-5}, E_n]\} \\ \text{dla } d = 3, \quad \bar{y} &= \{[E_1, E_6, E_{11}], [E_2, E_7, E_{12}], \dots, [E_{n-10}, E_{n-5}, E_n]\} \end{aligned}$$

itd. uogólniając:

$$\begin{aligned} &\text{dla danych } \tau \text{ i } d, \\ \bar{y} &= \left\{ \begin{aligned} &[E_1, E_{1+\tau}, \dots, E_{1+(d-1)\tau}], [E_{i+1}, E_{(i+1)+\tau}, \dots, E_{(i+1)+(d-1)\tau}], \dots \\ &\dots, [E_{n-(d-1)\tau}, E_{n-(d-2)\tau}, \dots, E_{n-(d-d)\tau}] \end{aligned} \right\} \quad (2.4) \end{aligned}$$

Wektory \bar{y} tworzą d -wymiarową przestrzeń zanurzoną, w której rekonstruowany jest atraktor. „Szeregi czasowe” czasu wystąpienia wstrząsu (traktowanego tu jako zmienna układu) oraz lokalizacji epicentrów wstrząsów i odpowiadające im przestrzenie zanurzone tworzone były w ten sam sposób.

Przy rekonstrukcji atraktora na podstawie szeregu czasowego o nieznanym dynamice niezbędne jest żeby rekonstruowany atraktor „zanurzony” był w przestrzeni o dostatecznej liczbie wymiarów – takiej aby dynamika układu była w pełni reprezentowana. Rekonstruuje się więc atraktor w przestrzeni niskowymiarowej, oblicza się jego wymiar „zanurzony” a następnie zwiększa się o 1 wymiar euklidesowy przestrzeni zanurzonej, rekonstruuje atraktor i oblicza jego wymiar w tej nowej przestrzeni. Operację tą powtarza się badając ciąg przestrzeni zanurzonych o wzrastających wymiarach d do momentu osiągnięcia granicznej wartości wymiaru korelacyjnego atraktora D_2^a . Obliczenia korelacyjnego wymiaru fraktalnego atraktora dokonano przyjmując we wzorze (2.1) $q = 2$. Tu x_i, x_j są punktami atraktora. Oszacowania wymiaru korelacyjnego D_2^a w poszczególnych d -wymiarowych przestrzeniach zanurzonych dokonano analogicznie do estymacji wymiaru uogólnionego. Dla każdej zmiennej wymiar D_2^a , liczony był dla fazowych przestrzeni zanurzonych o wymiarach euklidesowych d od 1 do 15. Wyniki analiz wymiaru korelacyjnego przedstawia się na wykresach D_2^a od d . Wartość d w miejscu spłaszczenia wykresu oznacza d_{min} (najmniejszy wymiar zanurzenia) odniesiony do badanej wielkości czyli liczbę niezależnych zmiennych układu. Spłaszczenie krzywych wskazuje na obecność struktur koherentnych (o wymiarze fraktalnym), które w rzeczywistości są dziwnymi atraktorami ujawniającymi obecność zachowań chaotycznych w układzie.

Ostatnim etapem analizy zgromadzonych danych było badanie dynamiki przestrzeni fazowej poprzez wyliczenie największego wykładnika Lyapunova λ_{max} weryfikującego obecności zachowań chaotycznych w układzie. Wartość największego wykładnika λ_{max} jest miarą stopnia rozchodzenia się trajektorii układu podczas ewolucji – tempa z jakim układ tworzy lub niszczy informację jest więc miarą możliwości predykcyjnych układu. Śledzi się dywergencję trajektorii bliskiej trajektorii wybranej. Przy kolejnych szacowaniach szybkości rozbiegania dwóch punktów ewoluujących od odległości L_i do L_{i+1} co pewien czas konieczny jest wybór nowego sąsiada (aby odległość między sąsiadami pozostawała mała). Ostatecznie aby otrzymać λ_{max} na podstawie danych doświadczalnych, po n powtórzeniach rozciągania i renormalizacji odstepu estymata największego wykładnika Lyapunova obliczana jest na

podstawie algorytmu Wolfa ze stałym czasem ewolucji (Wolf 1985; Mortimer i Cichy 2001) i dana jest wzorem:

$$\lambda_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \ln(L_{i+1} / L_i)}{t_n - t_1} \quad (2.5)$$

Układ dynamiczny posiadający co najmniej jeden dodatni wykładnik Lyapunova jest układem chaotycznym. Wynik analizy λ_{\max} dla badanych zestawów danych prezentowane są na wykresach zależności λ od przesunięcia na danej trajektorii i bieżącej iteracji.

3. Opis serii danych

Wykonano analizę pięciu zbiorów danych sejsmiczności indukowanej działalnością górniczą. Współrzędne epicentrow serii sejsmiczności indukowanej eksploatacją miedzi i złota parametryzowane są w zewnętrznym układzie współrzędnych a związanej z wydobywaniem węgla kamiennego w poruszającym się układzie związanym ze środkiem ściany a jednostkami są metry. W tabeli poniżej zamieszczono podstawowe informacje o badanych zbiorach danych wraz z czasowym i energetycznym zakresem rejestracji.

Tabela 3.1.

Charakterystyka analizowanych zbiorów danych

Table 3.1.

The characteristics of analysed data sets

Zbiór danych		Zakres energii zdarzeń [J]	Zakres czasowy rejestracji
Nazwa zbioru danych	Liczebność		
ZG „Polkowice-Sieroszowice”	1870	$3.2 \cdot 10^3 - 1.0 \cdot 10^9$	18.06.1976 – 31.07.2000
ZG „Rudna”	1883	$2.0 \cdot 10^3 - 3.7 \cdot 10^7$	04.02.1984 – 23.02.2001
Kopalnia złota, RPA	1714	$2.6 \cdot 10^5 - 5.5 \cdot 10^{11}$	01.09.1990 – 15.11.1996
KWK „Katowice”	994	$1.0 \cdot 10^2 - 1.0 \cdot 10^6$	01.09.1985 – 04.09.1986
KWK „Wujek”	507	$5.0 \cdot 10^2 - 6.0 \cdot 10^6$	20.11.1992 – 05.10.1995

3.1. Kopalnie miedzi w LGOM

Do badań wybrano dane pochodzące z rejonu G-23 będącego częścią oddziału PW Zakładu Górniczego „Polkowice-Sieroszowice” (1870 zdarzeń) oraz zapisy pochodzące z połączonych rejonów G-12 oddziału PG i G-14 w oddziale PZ Zakładu Górniczego „Rudna” (1883 zdarzenia). Złoże miedzi Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego zbudowane jest z jednego pokładu łupków miedzionośnych o miąższości do 1 m oraz z poniżej zalegających okruszczowanych piaskowców i nadległych okruszczowanych dolomitów. Złoże eksploatowane jest systemem komorowo-filarowym metodą strzelań urabiających na głębokości około 1100 m pod powierzchnią terenu. Sejsmiczność obszaru eksploatacji jest o rząd wielkości silniejsza od sejsmiczności kopalń GZW (Laskownicka 1999).

3.2. Kopalnia złota w RPA

Badania przeprowadzono na zbiorze danych pochodzącym z rejestracji w jednej z kopalń złota złóż Republiki Południowej Afryki. Katalog obejmuje 1714 wstrząsów. Złóża złota Południowej Afryki tworzą gęste sieci drobnych żył kruszcowych – sztokwerków – w skałach metamorficznych. Obszar występowania złóża – Basen Witwatersrand – zaburzony jest licznymi uskokami oraz dajkami. Eksploatacja prowadzona jest systemem ścianowym o szerokości frontu około 30 m, do głębokości 3000 m pod powierzchnią terenu. Zdarzenia o podobnej formie występowania i rozkładzie jak wysokoenergetyczne wstrząsy w polskich kopalniach węgla kamiennego cechują się energiami o około rząd wielkości silniejszymi (Laskownicka 1999).

3.3. Kopalnie węgla kamiennego w GZW

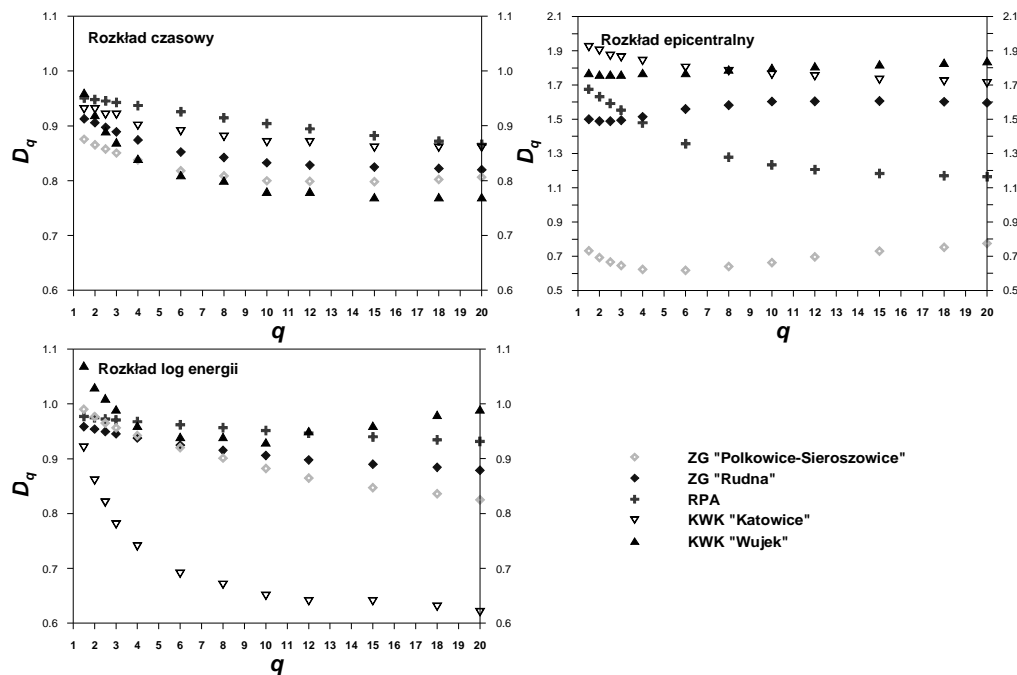
Badano dwa zbiory danych pochodzących z dwóch kopalń węgla kamiennego zlokalizowanych w Górnośląskiego Zagłębia Węglowego – KWK „Wujek” i KWK „Katowice”. Pierwszy zestaw danych zawiera 994 wstrząsów pochodzących z rocznej obserwacji sejsmiczności indukowanej eksploatacją ściany 532 w KWK „Katowice”. Układ współrzędnych związany był ze środkiem eksploatowanej ściany. Drugi zestaw danych dotyczy 507 wstrząsów generowanych podczas eksploatacji w KWK „Wujek” ściany 33 usytuowanej w obrębie pokładu 501 na głębokości 600 – 680 m. Pokład ten w całości eksploatowany był systemem ścianowym na dwie warstwy głównie z zawałem stropu, który stanowią serie piaskowca i łupków ilastych osiągające miąższość kilkunastu do kilkudziesięciu metrów (średnio 45 m). Całej eksploatacji w kopalni towarzyszyła wysoka aktywność sejsmiczna a górotwór w jej granicach należy uznać za naruszony i niestabilny. Złóże węgla kamiennego kopalni KWK „Wujek” i sąsiadującej z nią od północy kopalni „Katowice” zlokalizowane jest w centralnej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego na południowym skłonie siodła głównego. Od strony południowej linię graniczną stanowi uskok Kłodnicki, który zrzuca warstwy w kierunku niecki głównej. W obszarach górniczych tych kopalń w budowie geologicznej złóża do głębokości 1000 m biorą udział utwory czwartorzędu i górnego karbonu. Kopalnie „Wujek” i „Katowice” są jednymi z najbardziej zagrożonych sejsmicznie kopalń GZW. Prace górnicze w tych kopalniach prowadzone są w III stopniu zagrożenia tąpnięciami. Rozpatrywany wschodni rejon kopalń ograniczony jest od południa i wschodu uskokami o dużych zrzutach, a od północy przez zroby górnego piętra.

4. Omówienie wyników

Wyniki badania spektrów wymiarów uogólnionych D_q oraz przeprowadzonej analizy przestrzeni fazowych dla wszystkich badanych procesów sejsmicznych przedstawiają rysunki 4.1 i 4.2.

W tabeli 4.1 zestawiono obliczone estymaty wymiarów fraktalnych D_2 i D_∞ (przybliżane przez $D_{q=20}$) dla wszystkich zestawów danych i rozkładów badanych wielkości. W kolejnych kolumnach zebrano wymiary przestrzeni fazowych d_{min} wraz z wyznaczonymi estymatami wymiarów atraktorów D_2^a . Znakiem „>” oznaczono, brak wyraźnego poziomu stabilizacji krzywej. Dynamikę układów o takim przebiegu krzywej uznać należałoby za nie wykazującą przejawów niskowymiarowego chaosu deterministycznego a raczej dużo bardziej skomplikowaną – bliską przypadkowej. Zestawienie zamykają wyniki analizy największego

dodatniego wykładnika Lyapunova (znaki λ_{max}). Oznaczenie dla analizy λ_{max} „+/-” odnosi się do układów, dla których znak λ_{max} oscylował pomiędzy dodatnią a ujemną wartością na całej długości lub w końcowej części krzywej.



Rys. 4.1. Zestawienie krzywych $D_q - q$ ($q > 1$) dla rozkładu czasów, epicentrow oraz energii wstrząsów zapisanych we wszystkich analizowanych zbiorach danych

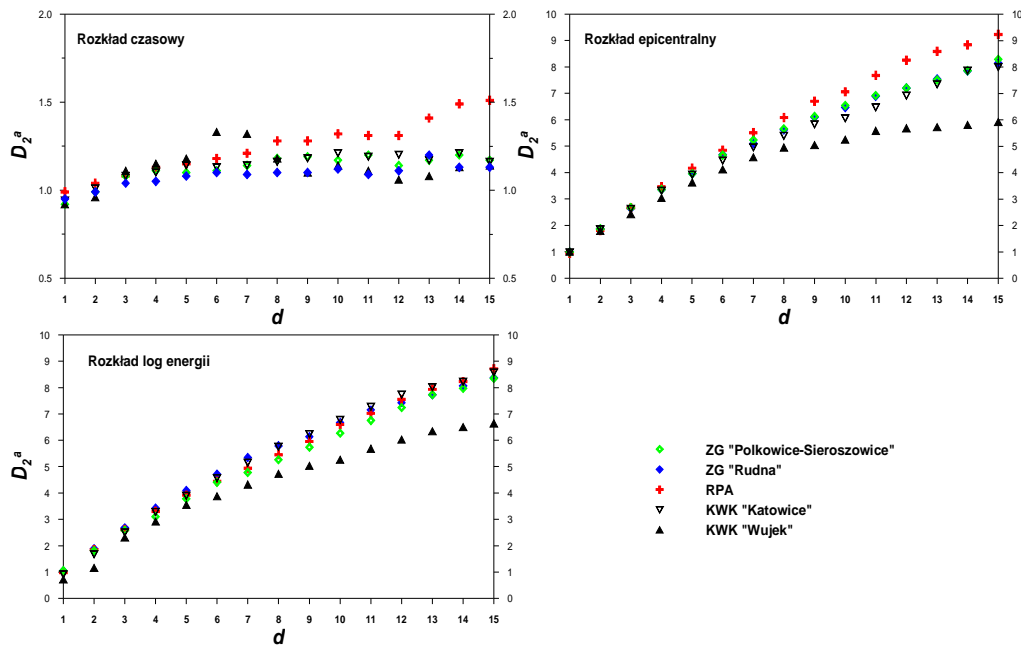
Fig. 4.1. Compilation of $D_q - q$ ($q > 1$) curves for the distributions of time, epicenters and energy of the events recorded for all data sets

Ocena analizowanych przypadków różnoskalowej sejsmiczności wywołanej eksploatacją jest w niniejszej pracy próbą uchwycenia pewnych ogólnych prawidłowości a nie jednoznacznym wyznaczeniem konkretnych wartości parametrów. Liczbowe wartości estymat pozwalają jedynie na jakościowe usystematyzowanie zaobserwowanych zachowań chaotycznych. Ich tabelaryczne zestawienie ma na celu stworzenie rozróżnienia i pogrupowanie uzyskanych rezultatów w pewne zbiory i na tej podstawie wyciągnięcia właściwych dla poszczególnych grup parametrów wniosków o zachowaniu i ewolucji układów. Zebrane liczbowe wartości nie mają charakteru dowodów obecności bądź braku chaosu u badanych układach, natomiast wskazują problemy i kierunek prowadzenia dalszych badań.

Na podstawie uzyskanych rezultatów analizy widma wymiaru uogólnionego dla rozkładów współrzędnych, czasów wystąpienia i energii wstrząsów towarzyszących procesom pękania i manifestujących się jako wstrząsy w kopalniach uzyskano liniowość relacji (2.1). Przebadane rozkłady mają charakter multifraktalny ale reprezentują serie o różnej heterogeniczności.

Widma $D_q(q)$ określone dla czasu wystąpienia wstrząsu są zbliżone i niemal we wszystkich przypadkach stabilizują się pomiędzy wartościami wymiaru $D_\infty = 0,81-0,87$. W tym przedziale nie mieści się widmo dla KWK „Wujek” ($D_\infty = 0,77$). Silna heterogeniczność w połączeniu z niskimi wartościami D_q wskazującymi na obecność wyraźnego samopodobieństwa zdarzeń

świadczyć może o odmienności procesu wstrząsotwórczego w tej kopalni. Słabsze samopodobieństwo i zbliżony do siebie, nisko heterogeniczny przebieg mają pary widm: ZG „Polkowice-Sieroszowice” i „Rudna” oraz KWK „Katowice” i kopalni złota w RPA. Widmo multifraktalne dla tej ostatniej kopalni osiąga największe wartości wymiarów D_q . Spektra $D_q(q)$ dla „Polkowic” i „Rudnej” mają bardzo zbliżony przebieg, co wydaje się w pełni uzasadnione ze względu na bardzo zbliżone sposoby eksploatacji stanowiące genezę wstrząsów. W przypadku kopalń węgla podobieństwo takie nie jest obserwowane.



Rys. 4.2. Wyniki badania przestrzeni fazowej i wymiaru atraktora zrekonstruowanego na podstawie rozkładu czasów, epicentrów i energii wstrząsów dla różnych typów sejsmiczności indukowanej
 Fig. 4.2. Results of the phase space and reconstructed attractor dimension studies on the base of time, epicenters and energy distributions for different types of induced seismicity

Tabela 4.1

Wyniki analizy multifraktalności, badania przestrzeni fazowej i λ_{max} dla wszystkich zestawów danych i rozkładów wszystkich zmiennych

Table 4.1.

Results of the multifractality analysis, studies of the phase space and λ_{max} for all data sets and all variables distributions

Badana wielkość →		czas					xy					energia				
Zbiór danych	Ilość zdarzeń	Multifrakt.		Prz. faz.		znak max	Multifrakt.		Prz. faz.		znak max	Multifrakt.		Prz. faz.		znak max
		D_2	D_∞	d_{min}	D_2^a		D_2	D_∞	d_{min}	D_2^a		D_2	D_∞	d_{min}	D_2^a	
Polkowice	1870	0.87	0.81	4	1.11	+	0.69	0.77	>15	>8.29	-	0.98	0.82	>15	>8.35	-
Rudna	1883	0.91	0.82	4	1.10	+	1.50	1.60	>15	>8.15	+	0.95	0.88	>15	>8.37	+/-
RPA	1714	0.95	0.87	8	1.30	+	1.63	1.16	>15	>9.23	+/-	0.97	0.93	>15	>8.71	-
Katowice	994	0.93	0.85	5	1.14	+	1.90	1.71	14	7.92	+/-	0.86	0.62	>15	>8.13	+/-
Wujek	507	0.92	0.77	5	1.12	-	1.76	1.84	11	5.74	+/-	1.03	0.99	13	6.49	-

Przebiegi spektrów multifrakalnych dla rozkładów epicentrow wstrząsów są najbardziej zróżnicowane. W przypadku „Rudnej”, KWK „Katowice” i „Wujka” wartości D_∞ grupują się w okolicy 1,6-1,84. Na wykresach widoczny jest efekt wzrostu krzywej dla $q > 4$ może być on wywołany wzrostem błędu wyznaczenia estymaty D_q dla dużych wartości parametru q . Dla większych q liniowa część krzywej $C(R, q)$ (2.1) staje się krótsza a większość punktów grupuje się w początkowej i końcowej części krzywej /depupacja i saturacja/ co może wywoływać ‘przeestymowanie’ wymiaru D_q szczególnie dla krótkich serii danych. Zwykle jednak owo ‘przeestymowanie’ wymiaru nie przekracza wartości 0,10. Widma dla „Rudnej”, KWK „Katowice” i „Wujka” ujawniają słabą multifrakalność a wartości wymiaru mniejsze samopodobieństwo zdarzeń. Najbliższy przypadkowemu jest rozkład xy dla kopalni „Wujek”. Odmienny przebieg mają widma wykazujące silną multifrakalność uzyskane dla danych z RPA ($D_\infty=1,16$) oraz ZG „Polkowice-Sieroszowice” ($D_\infty=0,77$). Te ostatnie spektra wskazują również na większe samopodobieństwo w zbiorach danych. Niska wartość wymiaru dla „Polkowice” świadczy o wyjątkowo silnej koncentracji wstrząsów wzdłuż jednego kierunku. Różnią się od siebie przebiegi widm dla rozkładów współrzędnych źródeł wstrząsów w obu kopalniach miedzi co związane jest najprawdopodobniej z odmiennymi warunkami geomechanicznymi panującymi w dwóch różnych rejonach eksploatacji.

Spektrum multifrakalne $D_q(q)$ określone dla energii wstrząsów uzyskane dla KWK „Katowice” sugeruje silną multifrakalność a wartość wymiaru $D_\infty = 0,62$ świadczy o samopodobieństwie i bardzo niejednorodnym rozkładzie energii wstrząsów w tej kopalni. Widma dla pozostałych analizowanych zbiorów danych dotyczących kopalń miedzi i złota, oraz KWK „Wujek” wykazują nieco słabszą heterogeniczność a wartości D_∞ zmieniają się w przedziale (0,82; 0,99). Widma określone dla energii wstrząsów rejestrowanych w kopalniach węgla („Wujek”) i złota osiągają największe wartości D_q , niewiele mniejsze od 1. Wymiary fraktalne bliskie wymiarowi euklidesowemu (dla energii i czasu: 1 lub dla epicentrow: 2) badanej wielkości mogą wskazywać na losowość zbioru.

Przestrzenie fazowe rekonstruowane były z szeregow czasowych różnych zmiennych (t, xy, E) i należałoby się spodziewać, iż będą one tak samo opisywały analizowane procesy sejsmiczne. Jest jednak inaczej, ponieważ dla szeregu czasowego energii uzyskano inne wyniki niż dla czasu i rozkładów źródeł wstrząsów. Taki stan rzeczy może być związany np. z dokładnością wyznaczenia poszczególnych zmiennych, obcięciem części danych przez przyjęte progi energetyczne a tym samym istnieniem „fałszywych sąsiadów” czy też wpływ innych czynników np. na rozkład czasowy w sejsmiczności indukowanej przez zmianę postępu ściany. Podobne rezultaty, różne d_{min} dla różnych zmiennych uzyskali np. Mendecki i Radu dla kopalń złota w RPA (Radu i in. 1997).

Rekonstruując atraktor w przestrzeni fazowej zauważono, że dla większości serii zdarzeń wartości wymiaru D_2^a rosną ze wzrostem wymiaru d przestrzeni euklidesowej nie osiągając dla energii i współrzędnych xy wyraźnego przedziału nasycenia (takiego, w którym ich wartości nie ulegają już znaczącym zmianom). W takiej sytuacji wyznaczenie wymiaru atraktora było niemożliwe. Jedynie w przypadku KWK „Wujek” wysycenie jest dobrze widoczne a szacowanie ilości wymiarów przestrzeni fazowej i wartości wymiaru atraktora najbardziej jednoznaczne. Krzywa stabilizowała się w okolicy $d = 11$ (epicentra) i $d = 13$ (energia) co wskazuje na obecność zachowań chaotycznych w układzie. Od $d = 14$ zaobserwowano słabe nasycenie wymiaru atraktora dla KWK „Katowice” (epicentra). Na krzywych wykreślonych dla energii i xy zauważalna jest słaba zmiana tempa wzrostu D_2^a w okolicy $d = 7-9$. Jednakże przy dalszym wzroście wymiaru zanurzenia d , wymiar atraktora nadal się zwiększa osiągając wartość maksymalną dla $d = 15$.

Dla rozkładu czasowego zdarzeń obserwowane są wyraźne poziomy nasycenia. Dla wszystkich zestawów danych występują od $d = 4 - 5$. Taką liczbę niezależnych zmiennych opisujących procesy wstrząsotwórcze indukowane górnictwem miedzi i węgla. Wyjątek stanowi tu kopalnia złota, dla której plateau rozpoczyna się dla $d = 8$. Dalej ($d > 11$) wszystkie przedziały ulegają destabilizacji co prawdopodobnie wiąże się z narastaniem błędów obliczeń (Baker i Gollub 1998). Niskowymiarowość zrekonstruowanych przestrzeni fazowych sugeruje istnienie możliwości przewidywania ewolucji tych układów. Dla rozkładu czasu estymaty wymiaru korelacyjnego atraktorów we wszystkich przypadkach jest bliskie 1. Nieco większe wartości zaobserwowano dla danych z: KWK „Katowice” i RPA ($D_2^a = 1,14$ i $1,3$). W przypadku KWK „Wujek” poziom nasycenia jest najbardziej niestabilny. Taki rozkład D_2^a jest trudny do zinterpretowania, co w przypadku sejsmiczności indukowanej jest dość typowe dlatego, że podczas eksploatacji rozkład czasowy często jest zaburzany poprzez czynniki zewnętrzne takie jak np. zmiany postępu ściany. Wartość wymiaru mimo znacznych fluktuacji niemal pokrywa się z obliczoną dla kopalni „Katowice”.

Przebieg krzywej dla rozkładu xy dla „Katowice” jest bardzo zbliżony do uzyskanej dla rozkładu energii co wskazuje na możliwość istnienia bliskiej zależności pomiędzy energią a przestrzennym rozkładem sejsmiczności w tej kopalni. W przypadku danych z KWK „Wujek” dla odległości xy nasycenie utrzymuje się na względnie stałym poziomie. Procesy sejsmiczne rejestrowane w dwóch kopalniach węgla różnią się znacznie wymiarem atraktora, odpowiednio: 5,74 i 7,92 co może wskazywać na różny stopień determinizmu w tych układach. Dla energii jedyny możliwy do wyznaczenia wymiar atraktora wynosi 6,49 (KWK „Wujek”).

Obliczenie i analiza znaku maksymalnego wykładnika Lyapunova miała na celu ostateczne potwierdzenie obecności zachowań chaotycznych ($\lambda_{max} > 0$) w ewolucji poszczególnych badanych układów. Wyniki analizy pozwalają na sformułowanie następujących uwag i wniosków:

W 5/15 przypadków otrzymano wartości dodatnie λ_{max} , które mogłyby potwierdzić obecność chaosu deterministycznego we właściwych seriach danych. Obecności zachowań chaotycznych stwierdzono przede wszystkim w rozkładach czasowych wstrząsów (4/5) co potwierdziło wyniki badania przestrzeni fazowej tych procesów. Wartości największego wykładnika Lyapunova określone jako oscylujące pomiędzy wartością dodatnią i ujemną stanowią 1/3 uzyskanych wyników są niejednoznaczne i trudne do interpretacji. W 5 przypadkach wykładnik był ujemny co oznacza, iż w tych układach nie uzyskano potwierdzenia obecności chaosu deterministycznego. Taki rezultat dotyczył szczególnie rozkładów energetycznych wstrząsów. Ujemna wartość wykładnika Lyapunova może wynikać z małej długości analizowanych zbiorów danych (np. KWK „Wujek”) lub obciążenia energetycznych. Taki wynik dotyczył rozkładów energetycznych dla ZG „Polkowice-Sieroszowice”, KWK „Wujek”, kopalni złota w RPA. Częściowe potwierdzenie zgodności analizy przestrzeni fazowej i λ_{max} zaobserwowano dla rozkładu czasowego w przypadku ZG „Polkowice” i „Rudna”, RPA, KWK „Katowice”. Wyniki sugerowały obecność chaosu w układach. Zgodność obydwóch analiz wyeliminowała natomiast obecność zachowań chaotycznych w przypadku rozkładu energetycznego RPA i Północnej Kalifornii. Niejasne są wyniki uzyskane dla KWK „Katowice” – xy . Układ ten odznaczał się $d_{min}=14$, $D_2^a=7,92$ a znak λ_{max} oscylował pomiędzy dodatnim a ujemnym. Takie rezultaty wskazują na istnienie pewnego prawdopodobieństwa obecności w układach zachowań chaotycznych. W pozostałych przypadkach nie można tu było stwierdzić czy chaos jest obecny w tych układach czy też nie. W ogólności wyniki analizy największego wykładnika Lyapunova korespondowały z rezultatami badania przestrzeni fazowej sejsmiczności lub były do nich zbliżone.

5. Podsumowanie i wnioski

- dla wszystkich serii sejsmiczności indukowanej rozkłady analizowanych parametrów zjawisk sejsmicznych generowanych procesem pęknięcia i niszczenia skał różnego typu, miały strukturę fraktalną lub multifraktalną,
- badane parametry dynamiki chaotycznej mogą być stosowane do analizy danych i jakościowego opisu różnych typów procesów sejsmicznych. Sejsmiczność indukowana eksploatacją miedzi okazała się procesem bardziej heterogenicznym i niżej wymiarowym w porównaniu z wstrząsami generowanymi wydobywaniem złota,
- zrekonstruowane przestrzenie fazowe w ogólności okazały się wysokowymiarowe. Liczba niezależnych zmiennych rozpatrywanych procesów sejsmicznych w niektórych przypadkach była wyjątkowo trudna do określenia i nie dała jednoznacznych wyników,
- otrzymane wymiary atraktorów poszczególnych procesów pęknięcia świadczą o: chaosie niższego rzędu dla sejsmiczności w kopalniach węgla i częściowo miedzi oraz zachowaniach chaotycznych wyższego rzędu w przypadku sejsmiczności w kopalni złota
- ostatecznie na podstawie badania największego wykładnika Lyapunova uzyskano potwierdzenie obecności zachowań chaotycznych dla części badanych przypadków,
- zastosowane metody analizy danych nie dają jednoznacznych rozstrzygnięć, wskazują natomiast charakter problemów i kierunek prowadzenia dalszych badań,
- istotne może się okazać zastosowanie holistycznej analizy sekwencji zdarzeń sejsmicznych w przestrzeni fazowej, w której wszystkie dostępne zmienne charakteryzujące zbiór danych analizowane są równocześnie. Próba takiej analizy została podjęta i przedstawiona w pracy nt. badania przestrzeni fazowej różnoskalowej sejsmiczności (Kortas i Mortimer 2003),
- wobec uzyskanych wyników i podkreślonej we wnioskach pracy ich niejednoznaczności nasuwa się konieczność analizy przyczyn takiego stanu rzeczy. Pierwszym krokiem mogłaby być analiza stacjonarności bądź jej braku w domenie czasowej przeprowadzona dla wszystkich badanych serii danych.

Literatura

- [1] Baker G. L., Gollub J. P. 1998: Wstęp do dynamiki układów chaotycznych, Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- [2] Grassberger P., Procaccia I. 1983: Measuring the Strangeness of Strange Attractors, *Physica 9D Nonlin. Phenom.*, North-Holland Publ. Comp, 189 – 208.
- [3] Kortas Ł., Mortimer Z. 2003: Studies on the phase space of multiscale seismicity, *Acta Montana IRSM AS CR Series AB No. 23 (129)* 6 p.
- [4] Laskownicka A. 1999: Potencjalne możliwości prognostyczne wybranych parametryzacji serii wstrząsów: przykłady z kopalń węgla, miedzi i złota, *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.*, M-22 (310), 257 – 265.
- [5] Mortimer Z. 1997: Fractal Statistics for the Local Induced Seismicity in Some Polish Coal Mines, *Balkema, Rotterdam Symp. Rockburst and Seismicity in Mines*, ISBN 90 5410 8908.
- [6] Mortimer Z., Cichy A. 2001: Nonlinear dynamics parameters estimated from the induced seismicity in Polish coal mines, *Acta Geophysica Polonica*, vol. XLIX, no. 3, 303 – 316.
- [7] Radu S., Sciocatti, M., Mendecki A. J. 1997: Nonlinear dynamics of seismic flow of rock, In Mendecki A.J. (ed). *Seismic Monitoring in Mines*, Cambridge, Chapman & Hall: 159 – 177.
- [8] Takens F. 1981: Detecting strange attractors in turbulence, in *dynamical systems and turbulence*, eds. Rand D.A., Young L.S. *Lecture notes in mathematics vol. 898* Springer-Verlag Berlin, 366 – 381.
- [9] Wolf A., Swift J. B., Swinney H. L., Vastano J. 1985: Determining Lyapunov Exponents from a Time Series, *Physica 16D*, 285 – 317.

Symptoms of deterministic chaos in mining induced seismicity

The data sets related to exploitation of copper in LGOM, hard coal in two mines in GZW and gold in Rep. of South Africa were studied in the regard of the presence of non-linear dynamics and deterministic chaos. Particular sets differ in the energy range: from 10^2 - 10^6 J to 10^5 - 10^{11} J what indicates a different scale of the observed processes of rock fracturing and destruction. Four characteristic descriptors were analysed: generalized fractal dimension, the smallest embedded phase space dimension, the dimension of the reconstructed attractor of the process and the biggest Lyapunov exponent. The calculations were conducted for the time-space and energy distributions of the tremors. It turned out that for all data sets the distributions of the analysed parameters had the fractal or multifractal structure. Moreover, there was found that studied parameters of chaotic dynamics may be applied to the seismic processes description regardless the genetic type and scale of that processes. The application of the data analysis methodology to describe mining induced seismicity was confirmed. On the basis of non-linear dynamics parameters the certain, qualitative separation of the processes was obtained. In some cases the chaotic behaviour in the systems was confirmed.

Przekazano: 25 marca 2004 r.