

Anna LASKOWNICKA\*, Zofia MORTIMER\*\*,  
Barbara KORYTOWSKA\*\*

\* GEOFIZYKA Kraków Sp. z o.o., Kraków

\*\* Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Kraków

±

## Badania dynamiki zdarzeń w przestrzeni fazowej procesu sejsmiczności indukowanej

### Streszczenie

Procesy sejsmiczności indukowanej i naturalnej mogą być przedstawione jako nieliniowe układy dynamiczne. Dynamika takich układów przejawia się przez zmiany położenia punktów – zdarzeń sejsmicznych – na trajektorii fazowej procesu.

W prezentowanej pracy wykonane zostały badania wielowymiarowej przestrzeni fazowej strumienia sejsmiczności z nieznaną liczbą wymiarów. Analizowano przestrzenie zanurzone, utworzone z obserwacji pojedynczych zmiennych. Wymiary przestrzeni fazowej i jej atraktor zostały aproksymowane przy zastosowaniu szeregów czasowych, złożonych z odległości czasowych wystąpienia zjawisk oraz uogólnionej odległości pomiędzy kolejnymi wstrząsami w przestrzeni energii i położenia zdarzeń. Szczególną uwagę poświęcono odległościom uogólnionym i ich zmianom związanym z obserwowanymi zmianami aktywności sejsmicznej.

### 1. Wstęp

Zjawiska sejsmiczności indukowanej i naturalnej mogą być prezentowane jako nieliniowe układy dynamiczne. Idee zaczerpnięte z mechaniki nieliniowej zjawisk w punkcie krytycznym wyjaśniają ogólne własności skalowalności – fraktalności – wstrząsów i dają inny, niż klasyczny, opis sejsmiczności. W światowych tendencjach badawczych sejsmiczności kolejne etapy, które daje się wyróżnić – dla sejsmiczności indukowanej omówione np. w (Gibowicz, Lasocki 2001) – to:

- badania fraktalności jako opisu geometrycznego rozkładu poszczególnych zmiennych,
- analiza zmian czasowych różnych wymiarów fraktalnych w powiązaniu z występowaniem wstrząsów silnych,
- badania chaosu deterministycznego i możliwości informacyjnych określających go parametrów.

Tektoniczne ~~Idee zaczerpnięte z mechaniki nieliniowej zjawisk w punkcie krytycznym wyjaśniają ogólne własności skalowalności – fraktalności – wstrząsów i dają inny opis sejsmiczności.~~ trzęsienia Ziemi i sejsmoakustyka w badaniach laboratoryjnych przejawiają niezmienniczość ze względu na skalę dla odległości w bardzo szerokim przedziale  $10^{-3}$ – $10^5$  m (np. Kagan 1999; Majewska, Mortimer 2000). Jest to również obserwowane dla sejsmiczności

indukowanej pracami górnictwami dla innych parametryzacji (np. Radu i in. 1997; Mortimer i in. 1999; Kortas, Mortimer 2004).

Pojęcie przepływu sejsmiczności zdefiniowano jako sejsmiczną składową nieelastycznej deformacji skał, związanej z pojawianiem się fluktuacji wszystkich parametrów mechanicznych i w konsekwencji przemieszczaniem się trajektorii w przestrzeni fazowej w kierunku lokalnej równowagi (Radu i in. 1997).

Przebieg fazowy strumienia sejsmiczności jest wielowymiarowy, jednak o nieznaną liczbę wymiarów – dynamicznych zmiennych niezbędnych do określenia chwilowego stanu układu. W badaniach pracach wielu seismologów spotyka się odmienne podejścia: od niskowymiarowej przestrzeni fazowej, do wysokowymiarowej – a więc podlegającej dynamice losowej. Badając układ dynamiczny o wielowymiarowej przestrzeni fazowej analizuje się przestrzenie zanurzone, utworzone z obserwacji pojedynczych zmiennych – szeregów czasowych energii, epicentrow, odstępów czasowych pomiędzy kolejnymi wstrząsami oraz wielowymiarowej uogólnionej odległości między zdarzeniami. Usiłuje się znaleźć jakąś regularność w katalogach zbiorów zdarzeń. Analizuje się, czy szereg jest raczej grupowany czasowo/przestrzennie czy losowy.

W pracy dynamika opisana jest przez zmiany położenia punktu – zdarzenia sejsmicznego – na trajektorii fazowej procesu. Badane są związki pomiędzy zmianami parametrów dynamiki nieliniowej a występowaniem silnych zdarzeń. Metodologia badań nawiązuje do wcześniejszych prac nad dynamiką nieliniową zdarzeń sejsmicznych (Mortimer, Cichy 2001; Mortimer 2002) łącząc je ze zmodyfikowanymi metodami *event thread analysis* (Suteanu 1998) oraz *single-link cluster analysis* (Frohlich, Davis 1990).

Na prezentowanym poniżej materiale badawczym przeprowadzono obliczenia i analizy odległości pomiędzy zdarzeniami na trajektoriach przestrzeni fazowej oraz wymiarów przestrzeni fazowej. Wyniki stanowią pewien etap prac, które będą dalej kontynuowane.

## 2. Metodyka badań

### 2.1. Dynamika nieliniowa

W opisie rozmaitych zjawisk przyrodniczych wprowadza się pojęcie wektora stanu. Jego składowe są niezależnymi od siebie wielkościami fizycznymi, które są niezbędne do jednoznacznego odtworzenia wektora w chwili następnej. Składowe wektora stanu tworzą współrzędne punktu w przestrzeni fazowej. Tory punktów w przestrzeni fazowej nazywane są liniami przepływu lub trajektoriami fazowymi.

Część przestrzeni fazowej taka, że każdy punkt, który zaczyna ruch w jej pobliżu, coraz bardziej zbliża się do niej, nazywana jest atraktorem. W długim okresie czasu działanie układu staje się coraz bliższe dynamiki atraktora. W przestrzeni fazowej trój- lub więcej wymiarowej układy nieliniowe mogą dążyć do atraktorów dziwnych. W ich obszarze ruch układu jest chaotyczny, zgodnie z definicją chaosu jako stochastycznego zachowania występującego w układzie deterministycznym. Wymiar atraktora dziwnego jest ułamkowy.

Logarytmiczną miarą określającą średnią szybkość rozbiegania się trajektorii są wykładniki Lapunowa. W układach dyssypatywnych chaotycznych co najmniej jeden wykładnik Lapunowa musi być dodatni, gdyż przynajmniej w jednym kierunku musi występować wykładnicze rozbieganie się trajektorii. Wykładniki Lapunowa mogą posłużyć do

---

$$T \approx \frac{1}{\lambda_+} \ln \left( \frac{L}{\varepsilon} \right)$$

szacowania czasu, dla którego przewidywania przyszłych stanów są poprawne. Po tym czasie nieoznaczoność współrzędnych wzrasta do rozmiarów atraktora — z punktu widzenia prognozowania układ staje się probabilistyczny. Dla stanów chaotycznych możliwe są jedynie prognozy krótkoterminowe.

— Powszechnie stosowana metoda dynamicznej analizy doświadczalnych szeregów czasowych dla określenia czy u podstaw istnieje dynamika chaotyczna ma postać dwuetapowej procedury:

— rekonstrukcja dziwnego atraktora nieznanego układu dynamicznego na podstawie szeregu czasowego

— określenie pewnych niezmienników układu na podstawie zrekonstruowanego atraktora (np. wykładników Lapunowa, wymiar atraktora).

Zakłada się, że na pojedynczy szereg czasowy mają wpływ wszystkie istotne zmienne dynamiczne, dlatego zawiera on dość kompletny zapis historii ewolucji układu. Dynamikę układu można odtworzyć na podstawie pojedynczego szeregu czasowego za pośrednictwem struktury geometrycznej zanurzonej w przestrzeni fazowej. Ten zanurzony zbiór geometryczny jest nazywany atraktorem zrekonstruowanym. Zakłada się, że na pojedynczy szereg czasowy mają wpływ wszystkie istotne zmienne dynamiczne, dlatego zawiera on dość kompletny zapis historii ewolucji układu. Rekonstrukcja atraktora z jednego szeregu czasowego wymaga stworzenia dodatkowych zmiennych poprzez ciąg wartości utworzonych z następujących po sobie wartości danego szeregu z pewnym opóźnieniem czasowym (Kortas, Mortimer 2004).

W przypadku rekonstrukcji atraktora ważne jest, aby był on zanurzony w przestrzeni o dostatecznej liczbie wymiarów. Jeśli zanurza się atraktor w przestrzeniach o wzrastającym wymiarze, ukazuje on coraz bardziej złożoną strukturę, a jego obliczony wymiar wzrasta. Kiedy wymiar atraktora przestaje wzrastać (stabilizuje się) można wymiar zanurzenia uznać za dostatecznie duży. Na ogół wystarcza, by wymiar atraktora był mniejszy od wymiaru zanurzenia.

## 2.2. Odległość pomiędzy zdarzeniami na trajektoriach w przestrzeni fazowej

Obserwacje Zdarzenia  $x_i, x_k$  traktowane są jako punkty w przestrzeni  $m$ -wymiarowej, a zbiór uogólnionych odległości  $d_{ik}$  między dwoma punktami może być traktowana jako odzwierciedlenie podobieństwa relacje dwóch obiektów, którym te obserwacje odpowiadają.

Szczególnym przypadkiem metryki przestrzeni jest uogólniona odległość euklidesowa:

$$d_{ik} = \left[ \sum_{j=1}^m w_j^2 (x_{ij} - x_{kj})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

gdzie:

$w_j$  – waga zmiennej  $X_j$ ,

$i, k$  – indeksy numerujące punkty – zdarzenia,

$j$  – indeks numerujący zmienne – szeregi czasowe dostępnych danych sejsmologicznych,

$m$  – liczba zmiennych.

Dla tak zdefiniowanej odległości nie mają znaczenia różne wymiary poszczególnych zmiennych (ich sens fizyczny) – odpowiedni dobór wag ustala relacje między nimi.

Jedną z możliwych normalizacji zmiennych odpowiada przyjęciu wag związanych z odchyleniem średnim:

$$w_j = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

gdzie:

$\bar{x}_j$  – średnia zmiennej  $X_j$ ,  
 $n$  – liczba zdarzeń.

Inną postacią normy może być normalizacja zmiennych do przedziału [0;1]:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{j \min}}{x_{j \max} - x_{j \min}} \quad (2.3)$$

gdzie:

$x_{j \min}$ ,  $x_{j \max}$  – minimum i maksimum zmiennej  $X_j$ .

W konkretnych zagadnieniach fizycznych można dla poszczególnych zmiennych narzucić różne wagi uwzględniające relacje pomiędzy nimi. Np. Frohlich i Davis (1990) zaproponowali

rozszerzenie definicji odległości zdarzeń sejsmicznych na czasoprzestrzeń. Stała skalująca ma zależeć od aktywności sejsmicznej tła, gęstości zdarzeń i magnitudy progowej analizowanych zdarzeń dla poszczególnych rejonów sejsmogenicznych. Dla wyodrębnienia aftershocków dla różnych katalogów autorzy stosowali czynnik skalujący, wybrany intuicyjnie – 1 km/dzień.

### 2.3. Metoda bootstrap

Próba uchwycenia różnic uogólnionych odległości pomiędzy zdarzeniami ~~w okresach poprzedzających silne zdarzenia~~ wykonana została z wykorzystaniem metody *bootstrap* dla wybranych z analizowanych szeregów przedziałów czasu, odpowiadających okresom pomiędzy silnymi wstrząsami.

„Bootstrapping” jest jedną z metod do oceny charakterystyk danej populacji, gdy nie dysponuje się dostateczną ilością prób, ~~jest~~ (Noubary 1999). Metoda ta polega na oszacowaniu charakterystyki nieznannej populacji poprzez jej symulację, gdy prawdziwa populacja jest zamieniona przez estymowaną.

Przyjmuje się, że analizowana próbka wyznacza badany rozkład, a następnie wykonuje się jej wielokrotne przepróbkowanie (resampling). Nowe próbki otrzymywane są z danych przy zastosowaniu generatora liczb losowych. Kolejne próbki mają tę samą ilość zdarzeń, przy czym losowe wartości z próbki oryginalnej mogą się w nich pojawiać wielokrotnie lub ani razu – matematycznie jest to wariacja z powtórzeniami.

W pracy zastosowano dwa sposoby konstrukcji próbek – zbiorów zdarzeń z 3/5 okresu pomiędzy silnymi wstrząsami. W pierwszym przypadku pozostawiono niezmienione położenie i czas wystąpienia zdarzeń, a przepróbkowaniu poddano zbiór energii  $E/\log E$ . W przypadku drugim położenie hipocentrów i energie pozostały takie same, natomiast czas pomiędzy zdarzeniami  $dt$  (gdzie:  $dt_n = t_n - t_{n-1}$ ) użyto jako zmiennej do wygenerowania nowych próbek

bootstrapowych. W ten sposób otrzymano zbiór tych samych zdarzeń sejsmicznych, które wystąpiły w tej samej kolejności, ale jak gdyby w innym czasie.

Dla każdego z analizowanych oryginalnych podzbiorów zdarzeń, zawierających odległość czasową od poprzedniego zdarzenia, współrzędne hipocentrum i energię z okresu „ciszy” sejsmicznej pomiędzy silnymi wstrząsami, utworzono po dziesięć generowanych próbek bootstrapowych dla każdej ze zmiennych –  $\log E$  i  $dt$ . Na ich podstawie obliczono wartości odległości uogólnionej  $d_{ik}$  charakterystyczne dla danego rejonu w okresie ciszy dla porównania ich z odległościami poprzedzającymi zwiększoną aktywność i ewentualnego dobrania czynników skalujących wagę poszczególnych zmiennych.

‡

### **3. Opis danych sejsmiczności indukowanej pracami górnictwymi**

Do celów badawczych wykorzystano indukowane pracami górnictwymi wstrząsy zarejestrowane przez lokalne sieci sejsmologiczne w kopalniach

węgla Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, ~~– KWK „Wujek” i KWK „Halemba”,  
Katowice~~

~~–miedzi Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego – ZG Polkowice Sieroszowice  
rejon 8 oraz oraz~~

~~kopalni złota Republiki Południowej Afryki „Western Deep Levels”.~~

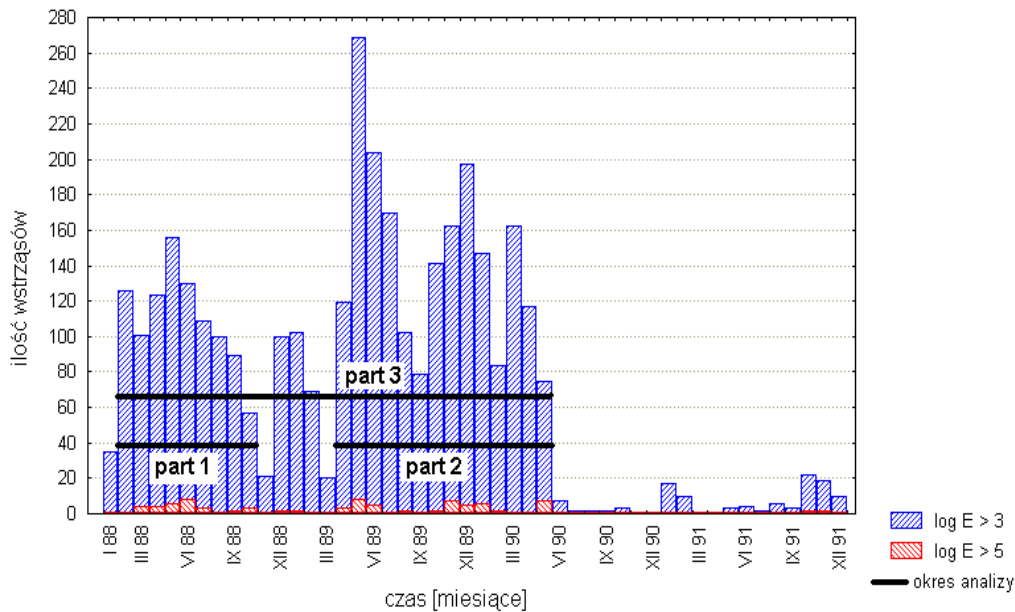
Dane sejsmiczne wybrano z katalogów kopalnianych w taki sposób, aby rozkład aktywności miesięcznej był możliwie równomierny i stabilny, tzn. nie zawierał okresów przerw w eksploatacji ani trendów. Szczegółową charakterystykę 10 wybranych zbiorów przedstawia tabela 3.1. Minimalną wartością energii  $E$  raportowanych zbiorów zdarzeń jest  $10^3$  J.

Tabela H3.1.  
 Charakterystyka analizowanych zbiorów danych sejsmiczności indukowanej  
 Table 3.1.  
 Characterisation of the analysed induced seismicity data sets

Obszar występowania	Okres rejestracji	Ilość zdarzeń	Zakres $\log E$ [J]	Średnia aktywność $a_{sr}$ [zd/mies]
KWK „Wujek” pokład 501				
ściana 1g3 (part1)	02.88–10.88	991	3,00–6,62	110
ściana 1g3 (part2)	04.89–05.90	2028	3,00–8,73	145
ściana 1g3 (part3)	02.88–05.90	3331	3,00–8,73	119
ściana 1g6	01.91–06.91	687	3,00–6,30	115
KWK „Halemba” pokład 506				
ściana 5	01.92–02.93	475	3,00–6,62	34
ściana 6	07.93–10.94	539	3,00–6,60	34
ZG Polkowice-Sieroszowice, dane z rejonu G-51, G-51a, G-51d, G-51f (strefa 8)	05.96–05.2000	785	3,50–8,28	16
kopalnia złota WDL „Western Deep Levels”				
rejon C	01.93–10.93	1093	3,00–9,06	109
rejon D	06.93–11.93	474	3,00–8,52	79
rejon E	03.93–12.93	1073	3,00–8,77	107
rejon F	03.93–09.93	707	3,00–7,85	101

Wybór danych ilustrowany jest na przykładzie zbiorów sejsmiczności ściany 1g3 KWK Wujek. Zbiory sprawdzono śledząc zmienność średniej aktywności sejsmicznej  $a_{sr}$  [ilość zdarzeń/miesiąc] względem przedziałów wyznaczonych z jednym lub dwoma odchyleniami standardowymi:  $\bar{a}_{sr} \pm \sigma$  oraz  $\bar{a}_{sr} \pm 2\sigma$ . W pierwszym przypadku zbiory nie zawierały maksimum aktywności, w drugim przypadku maksymalne wartości aktywności zostały objęte przedziałem, lecz zawierały się w nim także miesiące bardzo słabej aktywności.

Z tego względu zdecydowano się na metodę wyboru danych wg przedziału  $\bar{a}_{sr} \pm \sigma$  niezawierającego silnie obniżonej aktywności, wiążąc te okresy z przerwami w eksploatacji. Rys. 3.1 przedstawia rozkład aktywności sejsmicznej dla danych ze ściany 1g3 KWK Wujek z zaznaczeniem części wybranych do analizy. Oprócz dwóch zbiorów w miarę stacjonarnych (part1 i part2) dla porównania analizę przeprowadzono również dla zbioru o bardzo nierównomiernej aktywności (part3), zawierającego dwa poprzednie zbiory i okres zmniejszonej aktywności między nimi.



a)

Rys. H3.1. Rozkład aktywności sejsmicznej dla danych ze ściany 1g3, pokład 501 KWK Wujek, a) z okresu 1988–1991 z zaznaczeniem granic analizowanych zbiorów.

Fig. 3.1. Seismic activity distribution for data from the seam 501 KWK Wujek, the wall 1g3. The analysed sets are marked.

~~b) z okresu wykazanego w analizie jako part 3. Linia przerywana oznacza średnią aktywność z tego okresu, linie pomarańczowe  $X_{st} \pm \sigma$ , linie niebieskie  $X_{st} \pm 2\sigma$ , strzałki okresy part1 i part2 wybrane do analiz.~~

#### 4. Wyniki obliczeń

##### 4.1. Badania własności odległości uogólnionej – $ds$

Analizowane w każdym zbiorze wielkości  ~~$t$~~  to energia  $E$ , logarytm energii  $\log E$  oraz odległości  $ds$  w pięciowymiarowej lub czterowymiarowej zanurzonej przestrzeni fazowej procesu sejsmogenicznego. Przestrzeń rozpięta są na zmiennych: współrzędne hipocentrum –  $X, Y, Z$ , czas wystąpienia zdarzenia –  $t$  i energia  $E$  (w dalszym tekście oznaczenie odległości uogólnionej –  $ds$ ) bądź logarytm energii  $\log E$  (oznaczenie odległości uogólnionej –  $ds_{lgE}$ ). Decyzja, czy przestrzeń jest pięcio- czy czterowymiarowa, uzależniona była od dostępnych danych, tj. czy wyznaczone były wystarczająco wiarygodne wartości  $Z$ . Dane o głębokości wstrząsu istnieją dla zbiorów kopalń LGOM, złota i Halemba.

W tabeli 4.12 podane są zbiorcze wyniki statystyki opisowej zbiorów uogólnionych odległości  $ds$  i  $ds_{lgE}$  przy normowaniu zmiennych z zastosowaniem odchylenia standardowego – wzór (2.2) a

Wartości  $ds$  i  $ds_{lgE}$  zestawione w poniższej tabeli pozwalają stwierdzić, że odległości uogólnione różnią się dla poszczególnych kopalń, rejonów eksploatacji, a także okresów wystąpienia zdarzeń sejsmicznych.



Jak widać w tabeli odległości pomiędzy kolejnymi zdarzeniami liczone gdy jedną ze zmiennych była energia zdarzenia ( $ds$ ) i gdy zmienna tą był logarytm energii ( $ds_{lgE}$ ) korelują znacząco i silnie. Istnieje również korelacja tych wielkości z logarytmem energii. Fakt, że wartości współczynników korelacji pomiędzy odległościami liczonymi dla zbiorów oryginalnych i generowanych też są znaczne i istotne obrazuje dominujący wpływ na wartości odległości pozostałych współrzędnych przestrzeni fazowej.

Otrzymane wartości pozwalają wysnuć kilka wniosków:

- istnieją znaczące różnice pomiędzy odległościami zdarzeń w poszczególnych zbiorach.
- wartości odległości pomiędzy zdarzeniami liczone muszą być z wykorzystaniem logarytmu energii a nie samej energii, wartości odległości pomiędzy zdarzeniami liczone z wykorzystaniem logarytmu energii  $ds_{lgE}$  są bardziej wrażliwe na zaburzenia energii co uwiadcza się zarówno w różnicach ich wartości średnich jak i w zwiększonych wartościach odchyłań standardowych tych wielkości.
- na wartości średnie odległości nie miał widocznego wpływu interwał czasu rejestracji, lecz bardziej prawidłowym jest uniezależnienie się od niego toteż zdecydowano się, że zmienną przypisywaną kolejnemu zdarzeniu sejsmicznemu będzie nie czas wystąpienia zjawiska lecz interwał czasu od zjawiska poprzedniego.
- normowanie współrzędnych  $x, y, z$  poprzez ich wartości minimalne i maksymalne zniósłoby rozkład przestrzenny źródeł należy zastosować wspólną normę dla tych zmiennych.

Tabela 4.1.

Statystyka opisowa zbiorów

Table 4.1.

Descriptive statistics of the generalised distance sets

Rejon Statystyka opisowa zbiorów		Odległość uogólniona	Średnia	Minimum	Maksimum	Odch. Std.
KWK Wujek, pokład 501 ściana 1g3	part1	ds	0,130	0,000	1,000	0,109
		ds_lgE	0,198	0,000	0,836	0,128
	part2	ds	0,134	0,000	1,025	0,104
		ds_lgE	0,170	0,000	0,944	0,113
	part3	ds	0,120	0,000	1,002	0,093
		ds_lgE	0,157	0,000	0,940	0,102
KWK Wujek, pokład 501, ściana 1g6		ds	0,354	0,000	1,137	0,201
		ds_lgE	0,412	0,000	0,964	0,194
KWK Halemba, pokład 506	ściana 5	ds	0,205	0,008	1,025	0,137
		ds_lgE	0,286	0,028	0,903	0,148
	ściana 6	ds	0,229	0,008	1,011	0,153
		ds_lgE	0,339	0,035	0,884	0,174
LGOM rejon 8		ds	0,206	0,004	1,032	0,158
		ds_lgE	0,326	0,020	1,012	0,195
WDL	C	ds	0,319	0,015	1,239	0,177
		ds_lgE	0,395	0,030	1,069	0,181
	D	ds	0,364	0,000	1,132	0,192
		ds_lgE	0,437	0,000	1,096	0,205

	E	ds	0,298	0,027	1,121	0,167
		ds_lgE	0,368	0,034	1,102	0,173
	F	ds	0,385	0,000	1,071	0,188
		ds_lgE	0,452	0,000	1,075	0,193

W tabeli 34.2 zestawione są przykładowo wartości współczynników korelacji między zmiennymi dla zbiorów oryginalnych ( $o\_ds$ ,  $o\_ds\_lgE$ ,  $logE$ ) i generowanych ( $gl\_ds$ ,  $gl\_ds\_lgE$ ,  $gl\_logE$ ) dla danych 1g3 part1 i part2 oraz 1g6. Oznaczone współczynniki korelacji są istotne na poziomie istotności  $p < 0,05$ .

Jak widać w tabeli odległości pomiędzy kolejnymi zdarzeniami liczone gdy jedną ze zmiennych była energia zdarzenia ( $ds$ ) i gdy zmienna tą był logarytm energii ( $ds\_lgE$ ) korelują

znacząco i silnie. Istnieje również korelacja tych wielkości z logarytmem energii  $\log E$ . Fakt, że wartości współczynników korelacji pomiędzy odległościami liczonymi dla zbiorów oryginalnych i generowanych też są znaczne i istotne obrazuje dominujący wpływ na wartości odległości pozostałych współrzędnych przestrzeni fazowej.

Tabela 4.2.

Wartości współczynników korelacji dla zbiorów  $lg3$  part1 i part2 oraz  $lg6$ .  
Ilość zdarzeń  $lg3$  part1 – 990,  $lg3$  part2 – 2027,  $lg6$  – 686.

Table 4.2.

Correlation coefficients for the data sets: part1, part2 – wall  $lg3$  and wall  $lg6$ .

	o_ds	o_ds_lgE	logE	o_ds	o_ds_lgE	logE	o_ds	o_ds_lgE	logE
	lg3 part1			lg3 part2			lg6		
o_ds	1,00	<b>0,73</b>	<b>0,11</b>	1,00	<b>0,83</b>	<b>0,11</b>	1,00	<b>0,92</b>	0,06
o_ds_lgE	<b>0,73</b>	1,00	<b>0,30</b>	<b>0,11</b>	1,00	<b>0,32</b>	<b>0,92</b>	1,00	<b>0,13</b>
logE	<b>0,11</b>	<b>0,30</b>	1,00	<b>0,76</b>	<b>0,32</b>	1,00	0,06	<b>0,13</b>	1,00
G1_ds	<b>0,78</b>	<b>0,57</b>	0,01	-0,00	<b>0,64</b>	0,04	<b>0,95</b>	<b>0,88</b>	-0,01
g1_ds_lgE	<b>0,54</b>	<b>0,38</b>	-0,01	<b>0,94</b>	-0,01	0,01	<b>0,87</b>	<b>0,81</b>	0,01
g1_logE	-0,02	-0,02	-0,04	<b>0,75</b>	<b>0,80</b>	<b>0,07</b>	0,01	0,02	-0,02

Aby uniezależnić wpływ interwału czasu rejestracji na wartości  $ds$  jako zmienną czasową przyjęto różnicę czasu pomiędzy dwoma kolejnymi zdarzeniami  $dt$ , gdzie  $dt = t_n - t_{n-1}$ . Poddano także analizie wpływ algorytmu normowania poszczególnych zmiennych wg wag opisanych wzorami (2.2) i (2.3)

W tabeli 4.3 i tabeli 4.4 zebrano wartości współczynników korelacji poszczególnych normowanych zmiennych i wartości odległości  $ds_{lgE}$ , liczonej w zanurzonej przestrzeni fazowej o normowanych współrzędnych:  $dt_{nor}$ ,  $logE_{nor}$ , pomiędzy zdarzeniami dla zbioru  $lg3$ -part1. Symbolami  $sa$  i  $sm$  oznaczono znormalizowane odległości euklidesowe epicentrow kolejnych zdarzeń. Oznaczenie  $**a$  dotyczy normalizacji wzorem ze średnią – wzór (2.2), oznaczenie  $**m$  normalizacji poprzez wartości min/max zgodnie ze wzorem (2.3).

Tabela 4.3.

Korelacje normowanych zmiennych i odległości uogólnionej  $ds_{lgE}$   
Obliczenia przy normowaniu zmiennych przez średnią.

Table 4.3.

Correlation coefficients of the normalized variables and generalized distance  $ds_{lgE}$ .  
Standardization by mean.

	dt_nor_a			
dt_nor_a	1,00	logE_nor_a		
logE_nor_a	-0,03	1,00	sa	
sa	0,05	-0,01	1,00	ds_lgE_a
ds_lgE	<b>0,35</b>	<b>0,27</b>	<b>0,25</b>	1,00

Tabela 4.4.

Korelacje normowanych zmiennych i odległości uogólnionej  $ds_{lgE}$ .  
Obliczenia przy normowaniu zmiennych przez różnicę max-min.

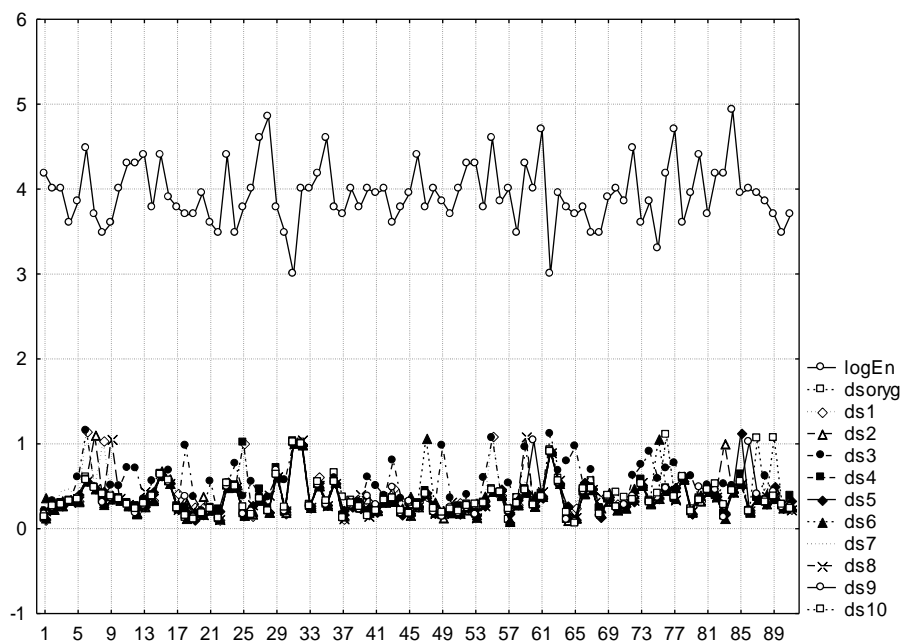
Table 4.4.

Correlation coefficients of normalized variables and generalized distance  $ds_{lgE}$ .  
Standardization by difference max-min.

	dt_nor_m			
dt_nor_m	1,00	logE_nor_m		
logE_nor_m	-0,03	1,00	sm	
sm	0,05	-0,01	1,00	ds_lgE_m
ds_lgE	<b>0,47</b>	<b>0,27</b>	<b>0,23</b>	1,00

Najbardziej istotne informacje noszą korelacje  $ds_{logE}$  z poszczególnymi zmiennymi – odzwierciedlają one wpływ poszczególnych zmiennych na wartości odległości.

Przykład zastosowania metody *bootstrap* do analizy zmienności odległości uogólnionej, obliczonej na zbiorach danych z okresów „ciszy” sejsmicznej ściany 1g3 KWK Wujek przedstawia wykres na rys. 4.1.



Rys. 4.1. Zmienność uogólnionych odległości zdarzeń przy normalizacji przez średnią w okresie ciszy dla prób bootstrapowych.

Fig. 4.1. Variations of generalized distances for 10 bootstrap samples of seismic events in „silence” period. Standardization by mean.

Obserwowany podobny charakter monotoniczności wykresów *ds* wynika z wpływu niezmiennych wartości położenia i energii zdarzeń dla wszystkich próbek generowanych. Wpływ energii jest bardzo słaby, co obrazuje tabela 4.5. Istotność oznaczonych współczynników korelacji stwierdzono na poziomie istotności  $p < 0,05$ .

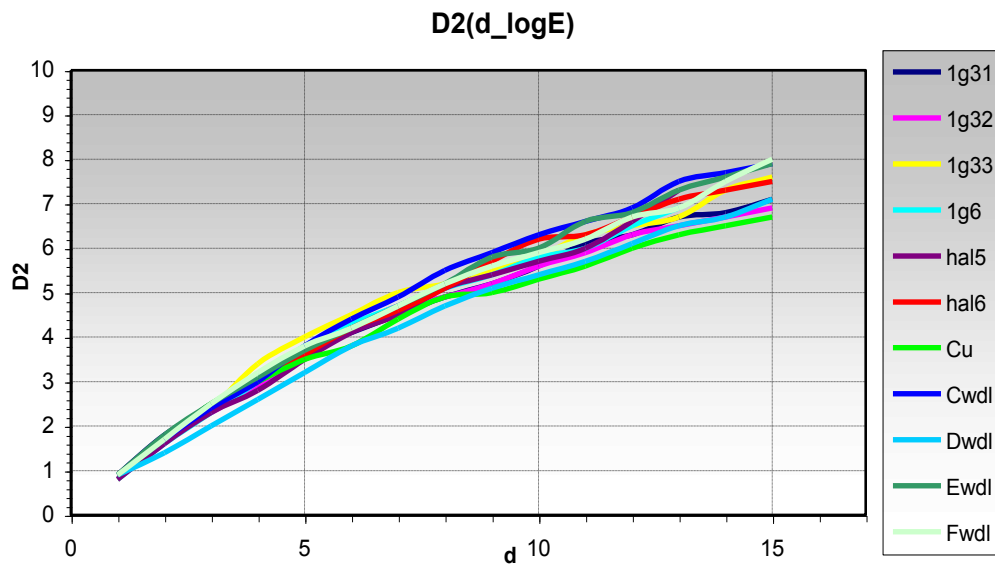
Tabela 4.5.  
Korelacje energii i odległości uogólnionych zbiorów oryginalnych danych sejsmicznych i generowanych metodą *bootstrap*

Table 4.5.  
Correlation coefficients of energy and generalized distances in original and bootstrap-generated data sets

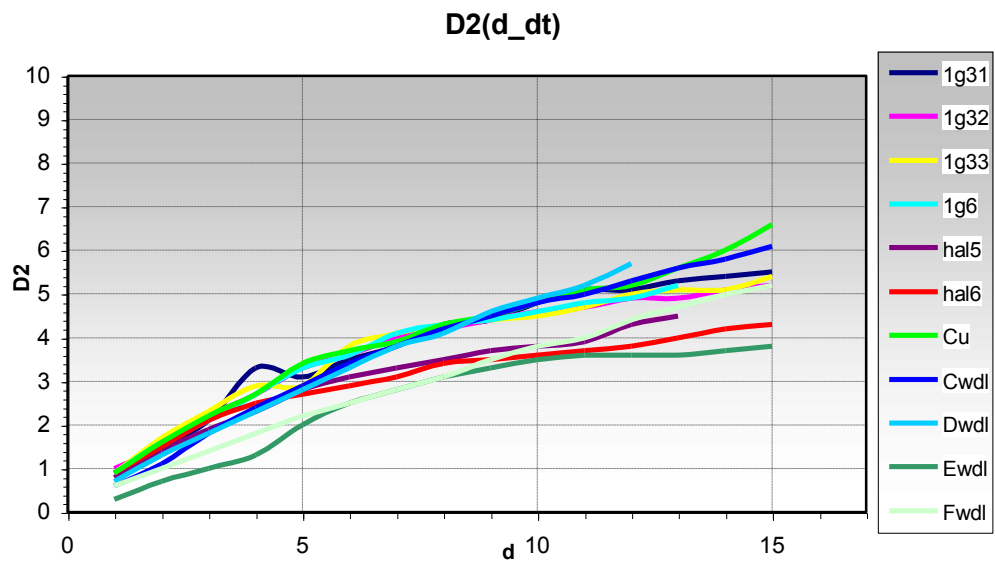
	<b>logEn</b>												
<b>logEn</b>	1,00	<b>ds_oryg</b>											
<b>ds_oryg</b>	-0,15	1,00	<b>ds1</b>										
<b>ds1</b>	-0,06	<b>0,67</b>	1,00	<b>ds2</b>									
<b>ds2</b>	-0,11	<b>0,76</b>	<b>0,61</b>	1,00	<b>ds3</b>								
<b>ds3</b>	-0,06	<b>0,42</b>	<b>0,51</b>	<b>0,45</b>	1,00	<b>ds4</b>							
<b>ds4</b>	-0,14	<b>0,78</b>	<b>0,83</b>	<b>0,71</b>	<b>0,43</b>	1,00	<b>ds5</b>						
<b>ds5</b>	-0,14	<b>0,86</b>	<b>0,71</b>	<b>0,77</b>	<b>0,49</b>	<b>0,82</b>	1,00	<b>ds6</b>					
<b>ds6</b>	-0,18	<b>0,76</b>	<b>0,60</b>	<b>0,68</b>	<b>0,41</b>	<b>0,73</b>	<b>0,77</b>	1,00	<b>ds7</b>				
<b>ds7</b>	-0,13	<b>0,82</b>	<b>0,67</b>	<b>0,74</b>	<b>0,52</b>	<b>0,78</b>	<b>0,83</b>	<b>0,76</b>	1,00	<b>ds8</b>			
<b>ds8</b>	-0,10	<b>0,76</b>	<b>0,62</b>	<b>0,67</b>	<b>0,48</b>	<b>0,73</b>	<b>0,77</b>	<b>0,72</b>	<b>0,78</b>	1,00	<b>ds9</b>		
<b>ds9</b>	-0,10	<b>0,73</b>	<b>0,58</b>	<b>0,64</b>	<b>0,38</b>	<b>0,69</b>	<b>0,74</b>	<b>0,69</b>	<b>0,73</b>	<b>0,66</b>	1,00	<b>ds10</b>	
<b>ds10</b>	-0,08	<b>0,77</b>	<b>0,67</b>	<b>0,72</b>	<b>0,43</b>	<b>0,77</b>	<b>0,80</b>	<b>0,72</b>	<b>0,88</b>	<b>0,72</b>	<b>0,69</b>	1,00	

#### 4.2. Badanie wymiarów przestrzeni fazowej

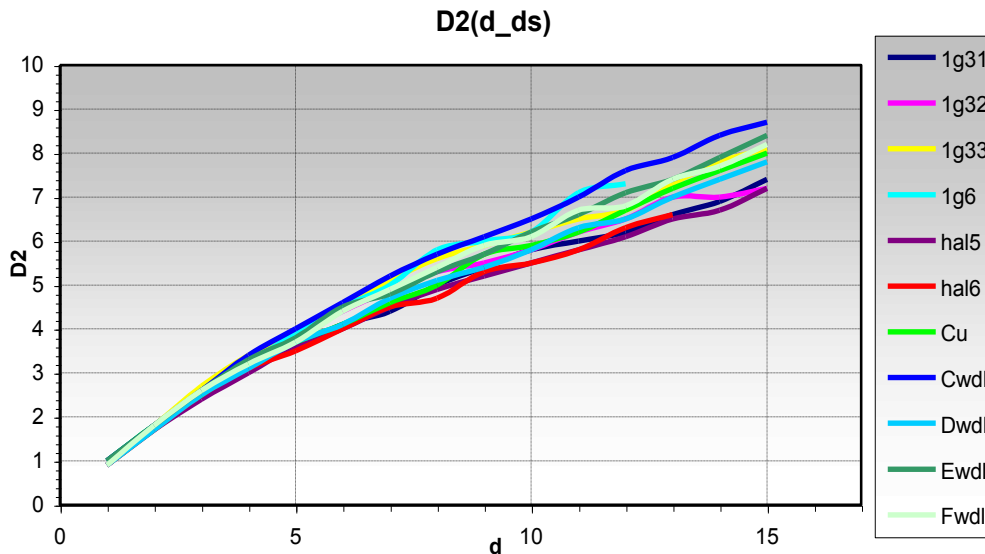
Gdy odtwarza się przestrzeń fazową sejsmiczności poprzez przestrzenie zanurzone utworzone z pojedynczych zmiennych (współrzędnych epicentrum/hipocentrum, odległości czasowych pomiędzy zdarzeniami i energii, bądź logarytmu energii) wyniki w większości przypadków (np. Radu i in. 1997; Mortimer 2002; Kortas, Mortimer 2004) różnią się w zależności od stosowanej do obliczeń zmiennej. Jest to prawdopodobnie wynikiem różnych czynników ograniczających bądź zniekształcających dane (np. ograniczenie rejestracji zdarzeń powyżej pewnego poziomu energii, mała dokładność wyznaczenia położenia ogniska lub wpływ czynników zewnętrznych, jak np. zmiana postępu ściany). Próba wykorzystania maksymalnej dostępnej informacji ze wszystkich rejestrowanych parametrów jest tworzenie przestrzeni zanurzonych na bazie szeregu uogólnionych odległości. Rezultaty tych obliczeń przedstawiają poniższe wykresy na rys. 4.2, rys. 4.3 oraz rys. 4.4, uwzględniając normalizację (2.3).



Rys. 4.2. Wykres zależności wymiaru  $D_2$  atraktora rekonstruowanego od wymiaru  $d$  euklidesowej przestrzeni zanurzonej, utworzonej na zmiennej  $\log E$   
Fig. 4.2. Plots of the reconstructed fractal dimension  $D_2$  vs. euclidean dimension of the embedded space constructed on  $\log E$  variable



Rys. 4.3. Wykres zależności wymiaru  $D_2$  atraktora rekonstruowanego od wymiaru  $d$  euklidesowej przestrzeni zanurzonej, utworzonej na zmiennej  $dt$   
Fig. 4.3. Plots of the reconstructed fractal dimension  $D_2$  vs. euclidean dimension of the embedded space constructed on  $dt$  variable



Rys. 4.4. Wykres zależności wymiaru  $D_2$  atraktora rekonstruowanego od wymiaru  $d$  euklidesowej przestrzeni zanurzonej, utworzonej na zmiennej  $ds$   
 Fig. 4.4. Plots of the reconstructed fractal dimension  $D_2$  vs. euclidean dimension of the embedded space constructed on  $\log E$  variable

Na wykresach widoczne jest, że stabilizacja atraktora rekonstruowanego zachodzi dla niższych wymiarów przestrzeni zanurzonej utworzonej na zmiennej  $dt$  niż na zmiennych  $\log E$  i  $ds$ . Dla wszystkich trzech przypadków można stwierdzić, że wymiar atraktora odtwarzanej przestrzeni fazowej sejsmiczności stabilizuje się, a więc dynamika układu nie ma charakteru losowego.

## 5. Podsumowanie

Badania wielowymiarowej – uogólnionej – odległości pomiędzy zdarzeniami na trajektoriach w przestrzeni fazowej sejsmiczności są próbą wprowadzenia nowej wielkości fizycznej opisującej ewolucję tego procesu. Na obecnym etapie prac analizowane było wprowadzenie różnych normalizacji zmiennych pozwalających wprowadzić zmienne bezwymiarowe, które mogą być wspólnie wykorzystane w obliczeniach.

Otrzymane wyniki pozwalają wysnuć następujące wnioski.

- Istnieją znaczące różnice pomiędzy odległościami uogólnionymi zdarzeń sejsmicznych w poszczególnych zbiorach danych.
- Wartości odległości pomiędzy zdarzeniami liczone powinny być z wykorzystaniem logarytmu energii, a nie samej energii, ponieważ wartości odległości  $ds \lg E$  są bardziej wrażliwe na zaburzenia energii. Uwidacznia się to zarówno w różnicach ich wartości średnich, jak i w zwiększonych wartościach odchyłeń standardowych.
- Na wartości średnie odległości nie miał widocznego wpływu interwał czasu rejestracji, lecz bardziej prawidłowym jest uniezależnienie się od niego toteż zdecydowano się, że zmienną

przypisywaną kolejnemu zdarzeniu sejsmicznemu będzie nie czas wystąpienia zjawiska lecz interwał czasu od zjawiska poprzedniego  $dt$ .

- Normowanie współrzędnych  $x, y, z$  poprzez ich wartości minimalne i maksymalne zniekształca rozkład przestrzenny źródeł. Należy zastosować wspólną normę dla tych zmiennych.
- Analiza odległości uogólnionej  $ds$ , obliczonej z oryginalnych i generowanych wielokrotnie zbiorów danych z okresów „ciszy” sejsmicznej, przyjętych jako 3/5 okresu pomiędzy silnymi zdarzeniami, wydaje się wskazywać na przypadkową zmienność parametru. Potwierdzałoby to tezę nt. niezależności w czasie kolejnych zdarzeń od siebie. Wynik taki pozwala na kontynuowanie badań porównujących odległości uogólnione charakterystyczne dla danego rejonu w okresie „ciszy” sejsmicznej oraz poprzedzającymi silne wstrząsy/zwiększoną aktywność.
- Analiza przestrzeni zanurzonych, utworzonych z obserwacji pojedynczych zmiennych pokazuje, że dla trzech zmiennych –  $\log E$ ,  $dt$  i  $ds$  – w miarę wzrostu wymiarów przestrzeni następuje stabilizacja wymiaru atraktora rekonstruowanego.
- Oszacowanie na podstawie badań przestrzeni zanurzonych wymiaru przestrzeni fazowej sejsmiczności pozwala stwierdzić, że wymiar atraktora odtwarzanej przestrzeni fazowej sejsmiczności stabilizuje się, a więc nie podlega ona dynamice losowej.
- W dalszych pracach konieczne wydaje się przeprowadzenie prób takiego doboru wag, który uwzględniłby wzajemne relacje zmiennych.

Wykonane obliczenia badające zmienność uogólnionej odległości oraz szacujące na jej podstawie wymiary przestrzeni fazowej i atraktora procesu stanowią podstawę do dalszych prac nad próbą zastosowania jej jako jednego z prekursorów wstrząsów silnych.

*Praca została wykonana w ramach Projektu Badawczego KBN 4T 12B 05126.*

## Literatura

- [1] Baker G.L., Gollub J.P. 1998: Wstęp do dynamiki chaotycznej. PWN, Warszawa.
- [2] Frohlich C., Davis S.D. 1990: Single-link cluster analysis as a method to evaluate spatial and temporal properties of earthquake catalogues. *Geophys. J. Int.* 100, 19–32.
- [3] Gibowicz S.J., Lasocki S. 2000: Seismicity induced by mining: Ten years later. *Advances in Geophysics* 44, 39–181
- [4] Jajuga K. 1990: Statystyczna teoria rozpoznawania obrazów. PWN, seria Biblioteka Ekonometryczna.
- [5] Kagan Y.Y. 1999: Universality of the seismic moment – frequency relation. *Pure Appl. Geophys.*, 155, 537–573.
- [6] Kortas Ł., Mortimer Z. 2004: Studies on the phase space of multiscale seismicity, *Acta Geodynamica et Geomaterialia* (tyt. poprz.: *Acta Montana*), vol. 1, no. 1, 27–33.
- [7] Lasocki S., Mortimer Z. 1998: Variations of MS source distribution geometry before a strong tremor occurrence in mines. *Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials Proc. of the 6th Conference*, H.R. Hardy, Jr., 325–337.
- [8] Majewska Z., Mortimer Z. 2000: Studies of the non-linear dynamics of acoustic emission generated in rocks. *Journal of Acoustic Emission*, vol.18, 1–7.
- [9] Mortimer Z, i in. 1999: Generalized fractal dimension of induced seismicity and acoustic emission. *Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. M-22* (310), 89–94.
- [10] Mortimer Z., Cichy A. 2001: Nonlinear dynamics parameters estimated from the induced seismicity in Polish coal mines. *Acta Geophys. Pol.*, vol. XLIX, no. 3, 303–316.



- [11] Mortimer Z. 2002: Studies on the chaotic dynamics of mining induced seismicity. Seismogenic Process Monitoring. H. Ogasawara, T. Yanagidani i M. Ando (eds), Balkema, Lisse, 341–354.
- [12] Noubary R. 1999: Statistical Methods for Earthquake Hazard Assessment and Risk Analysis. BOVA Science Publishers, Inc., New York.
- [13] Radu S. i in. 1997: Nonlinear Dynamics of Seismic Flow of Rock. [W:] Seismic Monitoring in Mines, Mendecki, A.J. (ed.), Chapman & Hall, Cambridge, 159–177.
- [14] Suteanu, C. 1998: Event Thread Analysis: a New Tool for the Characterization of Active Geodynamics Areas. Geofizica, Bucuresti, t. 36, 15–16.

### **Events dynamics investigations in the phase space of the induced seismicity process**

Phenomena of mining induced seismicity are presented as nonlinear dynamics systems. The dynamics is characterised by changes of the point – seismic event – position on the phase trajectory of the process.

Studying the multidimensional phase space of the seismicity flow, with an unknown number of the dimensions, embedded spaces constructed from the observations of individual variables were analysed. Dimensions of the phase space and its attractor were approximated based on the time series of the time distance and generalized distance between succeeding shocks, energy and the epicentre/hypocenter. Attention was chiefly concentrated on the generalized distances between succeeding shocks and their variations during high and low seismic activity.

*Przekazano: 21 marca 2006 r.*