

Elżbieta PILECKA

Polska Akademia Nauk Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią, Kraków

Określanie kierunków rozwoju sejsmiczności na podstawie statystycznej analizy położenia lineamentów na przykładzie wysokoenergetycznego wstrząsu z dnia 13 czerwca 2008 roku w ZG Rudna

Słowa kluczowe

wysokoenergetyczna sejsmiczność indukowana, kierunki lineamentów, analiza regresji i korelacji

Streszczenie

W artykule pokazano możliwości wykorzystania informacji pozyskanych z obrazów satelitarnych do analizy zagrożenia wysokoenergetycznymi wstrząsami na obszarze Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego. Pod uwagę brano lineamenty, które są charakterystycznymi liniami wyinterpretowanymi z obrazów satelitarnych i mogą odzwierciedlać strefy nieciągłości w górotworze. W pracy przyjęto, że wstrząsy wysokoenergetyczne o mechanizmie poślizgowym wytwarzają strefę nieciągłości, która może odzwierciedlać się w postaci lineamentu. Do określania kierunków rozwoju sejsmiczności wykorzystano równanie regresji między azymutem najbliższego lineamentu a azymutem wektora Kolejnych Epicentrów Wstrząsów (KEW-a), którego początkiem było epicentrum wysokoenergetycznego wstrząsu o energii $E \geq 1 \cdot 10^8$ J a końcem epicentrum wysokoenergetycznego wstrząsu o energii $E \geq 1 \cdot 10^6$ J. Na przykładzie wysokoenergetycznego wstrząsu z dnia 13 czerwca 2008 w ZG Rudna, wytypowano kierunek wystąpienia następnego wysokoenergetycznego wstrząsu.

1. Wstęp

Lineamenty w światowej literaturze opisywano przede wszystkim jako odwzorowania stref aktywnych sejsmicznie na powierzchni Ziemi. Interesujące są analizy wzajemnych relacji między lineamentami a rozkładem epicentrów trzęsień Ziemi, które najczęściej zlokalizowane są w strefach aktywnych sejsmicznie uskoku. Zagadnienie to omawiali w analizach sejsmotektonicznych m. in. [1, 5 i 3]. Jacobi [14] zaobserwował linearną zgodność położenia lineamentów, uskoku i grupy epicentrów trzęsień Ziemi na terenie Appalachian Basin w stanie New York (Kanada).

Rodriguez i in. [31] badali związek pomiędzy lineamentami a trzęsieniami Ziemi na Półwyspie Iberyjskim. Zastosowali oni kilkanaście metod badawczych w celu sejsmotektonicznej interpretacji podziału Półwyspu Iberyjskiego na megabloki strukturalne. Okazało się, że największa aktywność sejsmiczna koncentruje się na wydzielonych ważniejszych lineamentach, lub w bliskiej odległości od miejsc przecięcia lineamentów.

Podobnie Rukieh [32] przedstawił przykłady związku lineamentów z epicentrami trzęsień Ziemi dla Alaski oraz strefy ryftu arabskiego.

Liu i Haselwimmer [17] opisali pojawienie się nowego lineamentu jako odzwierciedlenia strefy pęknięcia. Podobny przypadek zaobserwował Sharifikia i in. [33] w odniesieniu do lineamentów z obrazów satelitarnych zaobserwowanych przed i po tektonicznym wstrząsie zaistniałym 28 maja 2004 roku w Iranie. Po wstrząsie zaobserwowano nowy lineament, który powiązano z kierunkiem pęknięcia masywu skalnego.

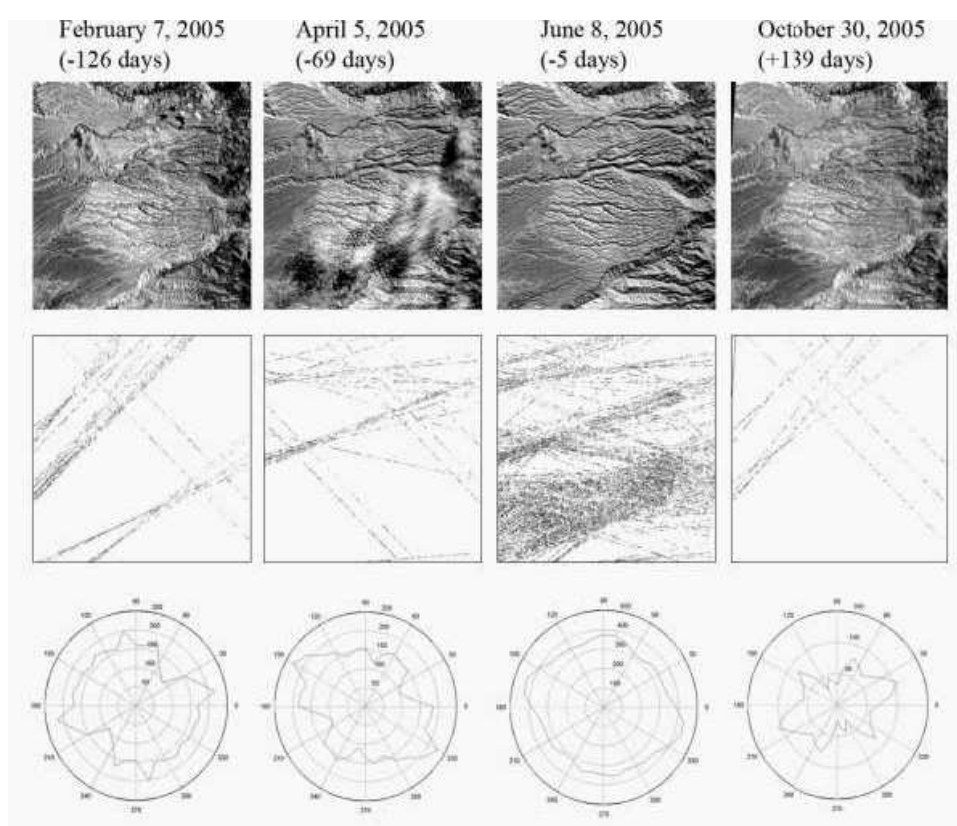
V.P. Singh i R.P. Singh [34] opisali zmiany kierunków lineamentów zaobserwowanych przed i po silnym trzęsieniu Ziemi w dniu 26 stycznia 2001 w rejonie Bhuj w Indiach. Kierunek nowego lineamentu wykazał dużą korelację z kierunkiem płaszczyzny rozrywu ogniska wstrząsu.

W literaturze światowej opisane są przykłady zmian położenia i liczby lineamentów spowodowane trzęsieniami Ziemi. Arellano-Baeza i in. [2] przeanalizowali pod tym kątem lineamenty w sześciu przypadkach o magnitudzie $M \geq 5,2$ z obszaru Chile, Peru i Tybetu. Zauważyli, że liczba i kierunek lineamentów zmienia się przed i po wystąpieniu trzęsienia Ziemi. W podanym przykładzie z dnia 13 czerwca 2005 w Chile (Arica) zaobserwowali zwiększenie liczby i kierunków lineamentów bezpośrednio przed trzęsieniem Ziemi. Po trzęsieniu zaobserwowali zmniejszenie liczby i kierunkowe „ułożenie” lineamentów. Autorzy [2] stwierdzili, że geometria lineamentów jest powiązana ze stanem naprężenia w masywie skalnym, a zwiększenie liczby i kierunków lineamentów bezpośrednio przed wstrząsem prawdopodobnie odzwierciedla proces dylatacji w masywie skalnym, a dominujący kierunek lineamentów po wstrząsie może odzwierciedlać kierunek pęknięcia (rys.1).

Na rysunku 2 przedstawiono lineamenty na terenie podziemnej kopalni węgla w stanie Utah [24]. Zaznaczony białą strzałką lineament na rysunku 2, odzwierciedlił się w podziemnym wyrobisku jako strefa spękanego stropu (rys. 3).

Według [25] trzy cechy lineamentów wykorzystuje się w zagadnieniach geotechnicznych: trendy kierunkowe, długość i kierunek oraz gęstość występowania na km^2 . Trendy kierunkowe lineamentów określają dominujące kierunki nieciągłości na danym obszarze np. kierunki dużych uskoków. Długości i kierunki lineamentów związane są z dominującymi trendami regionalnych struktur geologicznych. Gęstość lineamentów wskazuje na gęstość spękania górotworu. Lineamenty wykorzystywane są w górnictwie węgla kamiennego w USA jako jedna z cech, do oceny jakości skał stropowych [6, 22 i 23]. Elifrits i in. [7] przedstawił metodę do oceny warunków osiadania na terenie kopalni węgla kamiennego Herrin w USA. Wydobycie węgla odbywało się tam systemem komorowo-filarowym. Na podstawie stanu spękania skał stopowych, warunków górniczych i lineamentów oceniano zagrożenie zawałowe wyrobisk.

W Polsce badania związku lineamentów z sejsmicznością prowadził Graniczny [13] dla rejonu Bełchatowa, a Pilecka [26]; Pilecka i in. [27] w rejonie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego oraz w rejonie Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego Pilecka [28]. W pracy Pileckiej [29] wykazano, że istnieje statystyczny związek między kierunkiem kolejnych epicentrowo wysokoenergetycznych wstrząsów indukowanych a kierunkiem lineamentów w rejonie GZW i LGOM. Można przypuszczać, że kierunek lineamentu odzwierciedla strefę nieciągłości powstałą na skutek mechanizmu poślizgowego wysokoenergetycznego wstrząsu.



Rys.1. Przykład zmian kierunków i liczby lineamentów przed i po silnym trzęsieniu Ziemi z dnia 13 czerwca 2005 w Chile [2]



Rys. 2. Przykład lineamentów na terenie podziemnej eksploatacji węgla w stanie Utah [24]



Rys. 3. Pęknięcie w stropie w podziemnym wyrobisku związane z lineamentem [24]

2. Statystyczna analiza regresji i korelacji kierunków lineamentów i kierunków kolejnych epicentrów wysokoenergetycznych wstrząsów na terenie LGOM

Zagrożenie sejsmiczne w kopalniach LGOM wynika przede wszystkim z naruszenia równowagi górotworu w wyniku eksploatacji złoża miedzi, z występowania w stropie skał o dużej wytrzymałości i miąższości (dolomity, anhydryty), które mogą ulec gwałtownemu pękaniu oraz sposobu wybierania złoża [12, 4]. Analizą warunków występowania wysokoenergetycznego wstrząsu w warunkach eksploatacji LGOM zajmowało się wielu autorów między innymi [37, 35 i 36]. Prognozowanie wstrząsów i ich aktywne zwalczanie nabierają szczególnego znaczenia w sensie działalności profilaktycznej, towarzyszącej podziemnej eksploatacji rud miedzi w LGOM [15].

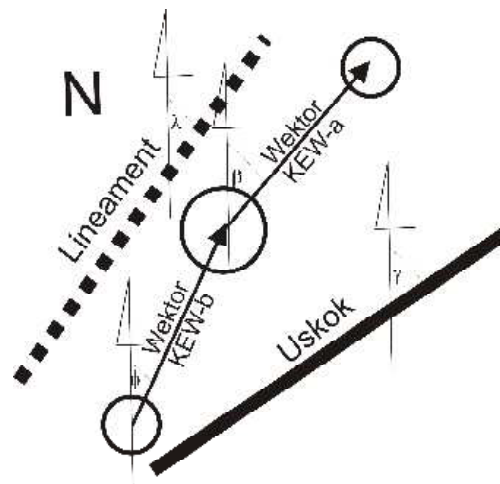
W rejonie LGOM nie jest jednoznacznie rozstrzygnięty problem wpływu tektoniki na sejsmiczność indukowaną. Niemniej jednak rozkład wstrząsów górotworu wskazuje na ich bimodalność [16]. Wstrząsy o energii sejsmicznej $E \leq 1 \cdot 10^7 \text{J}$ generowane są przez bieżące prowadzone roboty górnicze, natomiast wstrząsy o energii $E > 1 \cdot 10^7 \text{J}$ prawdopodobnie są spowodowane regionalnym zaburzeniem równowagi górotworu na skutek dokonanej eksploatacji na większej objętości złoża.

W kopalniach LGOM badania mechanizmów silnych wstrząsów dowiodły, że dominującym jest mechanizm ścinający (uskok normalny ze składową przesuwczą) [8, 9]. Jest to mechanizm podobny do naturalnych trzęsień Ziemi w strefach uskokowych. Badając pary wstrząsów o tej samej wielkości, występujących w pobliżu siebie w krótkim odstępie czasu, Gibowicz i in. [10] stwierdzili, że istnieje charakterystyczny rozkład przestrzenny takich dubletów. Rozkład ten wskazuje na istnienie charakterystycznych struktur liniowych o określonych kierunkach, często zbieżnych z kierunkiem płaszczyzn nodalnych określonych przez mechanizm ogniska jednego lub obydwu wstrząsów tworzących dublet oraz z kierunkiem rozrywów unilateralnych w ogniskach badanych zjawisk sejsmicznych. Takie korelacje świadczą o wspólnej genezie

sejsmicznych dubletów, związanych z dominującym systemem uskoków i spękań w konkretnych oddziałach kopalń LGOM.

Marcak [21] pokazał, że wstrząs sejsmiczny powstaje w wyniku rozwoju płaszczyzny nieciągłości i związanej z tym migracji sejsmicznej. Silny wstrząs górniczy jest poprzedzony kilkoma etapami deformacji takimi jak: odspojenie warstwy stropowej, wytworzenie płaszczyzny nieciągłości, rozwój tej strefy i związana z nim tzw. migracja sejsmiczna, zaciskanie szczelin w przyszłym obszarze źródłowym, wreszcie sejsmiczna relaksacja. Rozwojowi kolejnych etapów deformacji towarzyszą zmiany właściwości fizycznych i zmiany emisji fal sprężystych, które można rejestrować metodami geofizycznymi. Jakość oceny zależy zarówno od ilości i jakości wyników pomiarów geofizycznych jak i od ich częstości. Z drugiej strony prawidłowa interpretacja wyników tych pomiarów wymaga znajomości procesów rozwoju deformacji poprzedzającej silną relaksację sejsmiczną. Pomiar sejsmiczny i sejsmoakustyczne mogą być wykorzystane do identyfikacji powstania płaszczyzn nieciągłości [18, 19 i 20].

Wykorzystując doświadczenia dotyczące związku trzęsień Ziemi z lineamentami odzwierciedlającymi na powierzchni istniejące lub nowopowstałe nieciągłości, Pilecka [29] określiła metodami statystycznymi zależność między wysokoenergetyczną sejsmicznością indukowaną a lineamentami na terenach podziemnej eksploatacji w Polsce. Przeprowadziła ona analizę korelacji i regresji między następującymi zmiennymi: azymutami dwóch wektorów kolejnych epicentrow wstrząsów: KEW-b, gdzie końcem wektora jest silny wstrząs (o energii co najmniej $E \geq 1,0 \cdot 10^8$ J) i wektora KEW-a, gdzie początkiem wektora jest silny wstrząs (o energii co najmniej $E \geq 1,0 \cdot 10^8$ J) oraz azymutów najbliższego lineamentu i azymutu najbliższego uskoku. Schemat przejętych zmiennych przedstawiono na rysunku 4:



Rys.4 Zmienne wykorzystane w statystycznej analizie związku między wysokoenergetyczną sejsmicznością a lineamentami [29]; gdzie: λ - azymut najbliższego lineamentu, β - azymut wektora KEW-a (kolejnych epicentrow wstrząsów), którego początkiem było epicentrum wysokoenergetycznego wstrząsu o energii co najmniej $E \geq 1,0 \cdot 10^8$ J, a końcem było epicentrum wysokoenergetycznego wstrząsu o energii co najmniej $E \geq 1,0 \cdot 10^6$ J, γ - azymut najbliższego uskoku, ϕ - azymut wektora KEW-b (kolejnych epicentrow wstrząsów), którego początkiem było epicentrum wysokoenergetycznego wstrząsu o energii co najmniej $E \geq 1,0 \cdot 10^9$ J, a końcem było epicentrum wysokoenergetycznego wstrząsu o energii co najmniej $E \geq 1,0 \cdot 10^8$ J

Ten sposób przyjęcia zmiennych do analiz statystycznych wynika z aktualnie najbardziej prawdopodobnego modelu badanego zjawiska. Zastosowano typowe analizy statystyczne: badanie rozkładu zmiennych losowych, analizę korelacji, regresji, testowanie hipotez statystycznych. Wykorzystano do tych obliczeń program Statistica wer.6.1 i arkusze kalkulacyjne programu Excel. Analizę wykonano dla 41 przypadków najsilniejszych wstrząsów, które wystąpiły w LGOM w latach 1993-2006. W tabeli 1. podano wartości obliczonych współczynników korelacji.

Tab. 1. Współczynniki korelacji [29]

Współczynniki korelacji R Spearmana Poziom ufności $p < 0,05$				
zmienna	ϕ azymut wektora KEW-b	β azymut wektora KEW-a	λ azymut najbliższego lineamentu	γ azymut najbliższego uskoku
ϕ azymut wektora KEW-b	1,000	0,275	0,199	0,207
β azymut wektora KEW-a	0,275	1,000	0,744	0,110
λ azymut najbliższego lineamentu	0,199	0,744	1,000	0,035
γ azymut najbliższego uskoku	0,207	0,110	0,035	1,000

Przeprowadzona analiza korelacji wykazała jedyną istotną zależność między zmienną λ - azymut lineamentu a zmienną β - azymut wektora KEW-a epicentrów wstrząsów, gdzie początkiem wektora był wstrząs o energii $E \geq 1,0 \cdot 10^8 \text{J}$. Współczynnik korelacji Spearmana wynosi $R = 0,744$ z prawdopodobieństwem 95%. **Ze statystycznej analizy wynika, że następny wstrząs po wysokoenergetycznym wstrząsie (o energii $E \geq 1,0 \cdot 10^8 \text{J}$), jest związany z lineamentem ($R = 0,744$).**

W celu ustalenia modelu zależności między istotnymi zmiennymi czyli λ - azymutem lineamentu i β - azymutem wektora KEW-a przyjęto model regresji liniowy. Jako zmienną zależną przyjęto β - azymut wektora KEW-a, a zmienną niezależną λ - azymut lineamentu. Przeprowadzona analiza regresji wykazała najlepsze dopasowanie prostej o równaniu:

$$\beta = 31,1 + 0,88 \lambda \quad (I)$$

gdzie:

β – azymut wektora KEW-a,

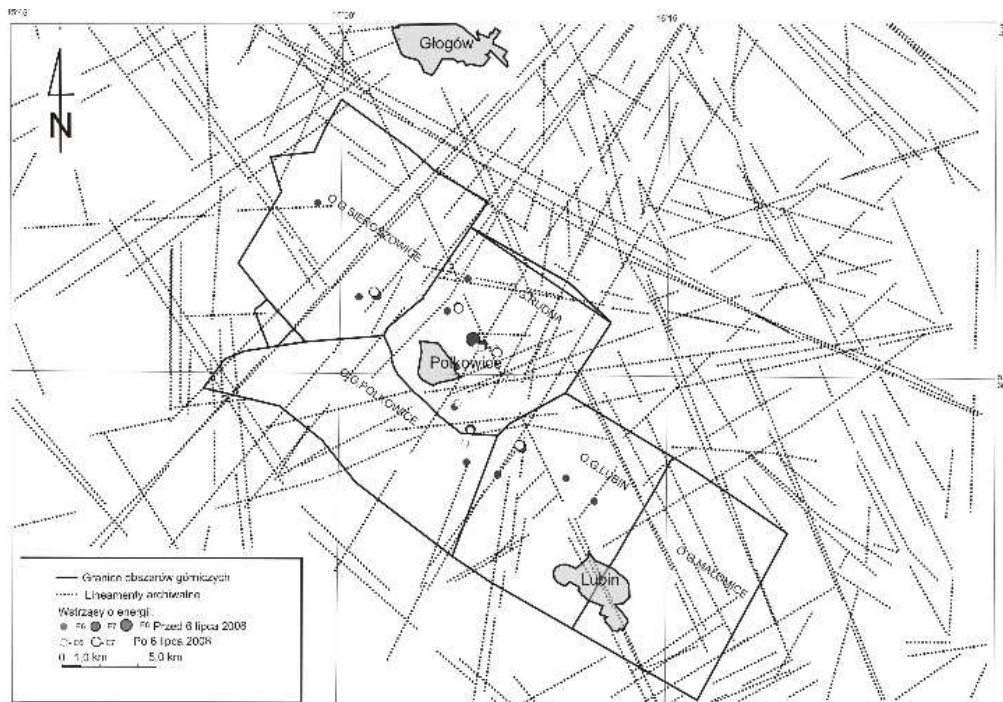
λ – azymut najbliższego lineamentu.

Statystyczne oceny istotności współczynników regresji powyższego równania podano w pracy Pileckiej [29]. Z powyższej analizy wynika, że kierunki lineamentów determinują

kierunek pęknięcia górotworu z tym, że widoczny jest on dopiero po wystąpieniu silnego wstrząsu o energii $E \geq 1,0 \cdot 10^8 J$.

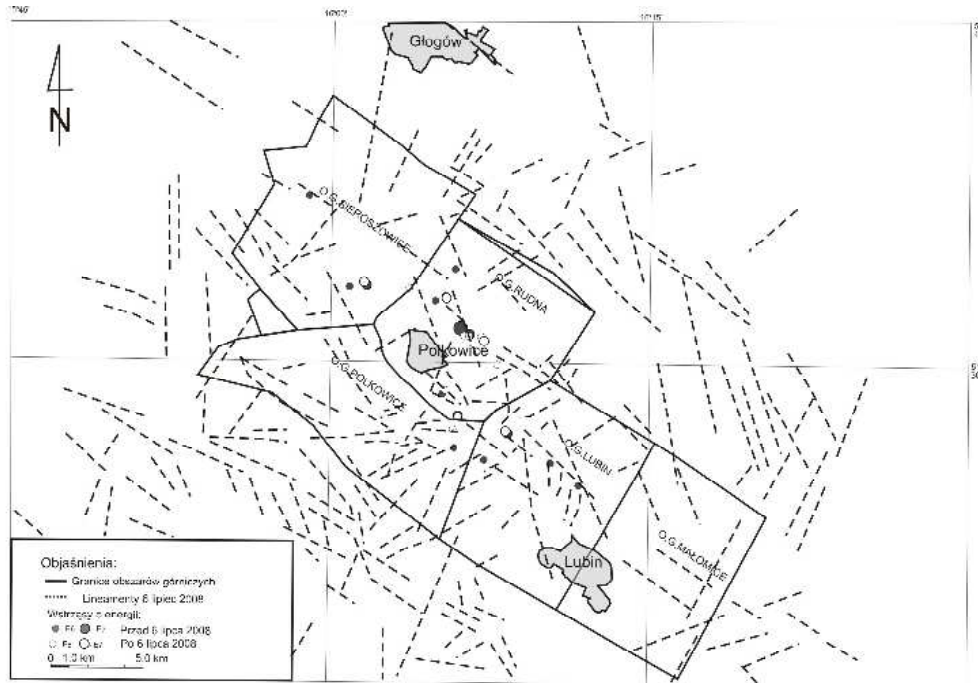
3. Analiza wstrząsu z dnia 13 czerwca 2008 roku o energii $E = 1,1 \cdot 10^8 J$ w ZG Rudna

Na rysunku 5 pokazano epicentra wstrząsów o energii $E \geq 1 \cdot 10^6 J$, które wystąpiły od 1 czerwca do 31 sierpnia 2008 na obszarach górniczych kopalń LGOM. Dla porównania na rysunku 6 pokazano lineamenty wyinterpretowane z obrazu radarowego z dnia 6 lipca 2008 roku na tle wstrząsów o energii $E \geq 1 \cdot 10^6 J$, które wystąpiły od 1 czerwca do 31 sierpnia 2008 na obszarach górniczych kopalń LGOM.

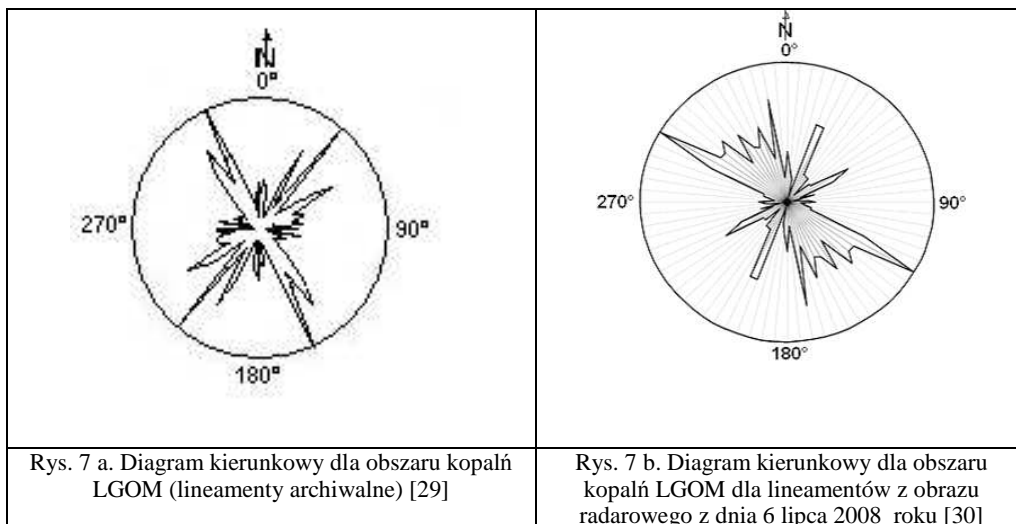


Rys. 5. Lineamenty archiwalne na terenie LGOM na tle wstrząsów o energii $E \geq 1 \cdot 10^7 J$, które wystąpiły od 1 czerwca do 31 sierpnia 2008 (opracowanie autorskie)

Z jakościowego porównania rysunków 5 i 6 wynika, że w rejonie analizowanego wstrząsu z dnia 13 czerwca 2008 roku o energii $E = 1,1 \times 10^8 J$ na obszarze kopalni Rudna, lineamenty z obrazu radarowego z dnia 6 lipca 2008 (rys. 6) układają się w dwóch kierunkach NNW – SSE i NW - SE, natomiast lineamenty archiwalne (rys. 5), w tym samym obszarze układają się w trzech kierunkach NNW – SSE, SSW – NNE, W – E. Z obrazu radarowego (rys.5) wynika jednoznacznie, że w przypadku silnego wstrząsu z dnia 13 czerwca 2008 roku dalszy rozwój sejsmiczności indukowanej wystąpił w kierunku NNW – SSE. Wyróżniający się kierunek NW-SE wynika prawdopodobnie z nieregularnego sposobu pęknięcia górotworu.



Rys. 6. Mapa lineamentów z radarowego obrazu satelitarnego z dnia 6.07.2008 na tle sejsmiczności indukowanej od $E \geq 10^6 J$ od 1.06.-31.08.2008 r. na obszarze kopalń LGOM (opracowanie autorskie)



Na rysunku 7 a przedstawiono diagram kierunkowy lineamentów archiwalnych, natomiast na rysunku 7 b diagram kierunkowy dla lineamentów wyinterpretowanych z obrazu satelitarnego z dnia 6 lipca 2008 roku. Na diagramie (rys. 7 b) po wystąpieniu silnego wstrząsu w dniu 13 czerwca 2008 r., zaznacza się dominujący kierunek NW – SE odpowiadający azymutowi ok. 120^0 (NW-SE). Kierunek ten „rozciąga się” aż do azymutu ok. 170^0 czyli do kierunku NNW – SSE. Zjawisko takie, że po silnym wstrząsie kierunki lineamentów „układają się” na diagramie kierunkowym w jednym dominującym kierunku zaobserwowano w kilku innych przypadkach [29]. Kierunek ten jest zgodny z kierunkiem propagacji wysokoenergetycznej sejsmiczności po wystąpieniu silnego wstrząsu.

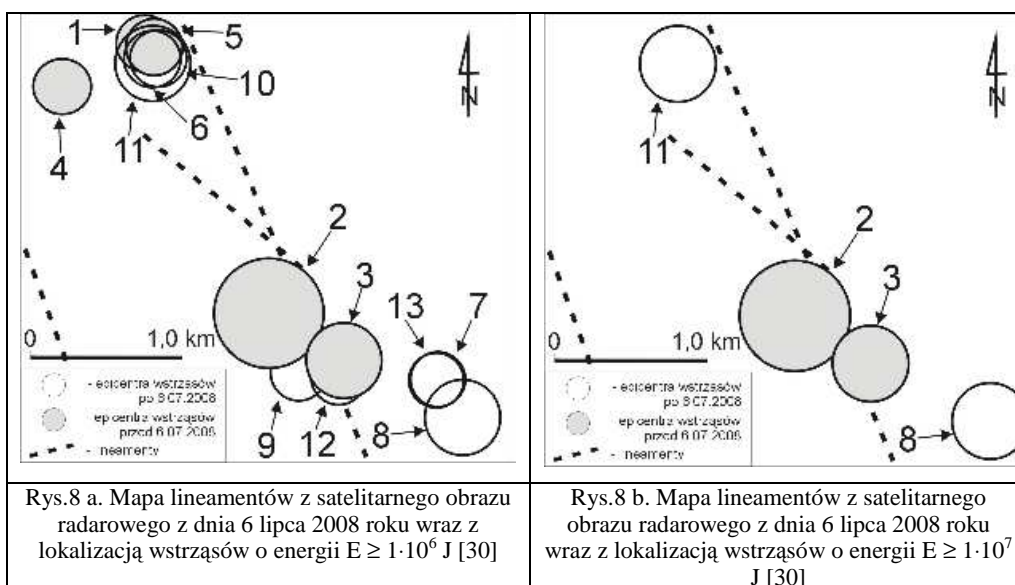
Poniżej przeprowadzono analizę stopnia dopasowania w/w kierunków wektorów kolejnych wstrząsów po silnym wstrząsie do wyznaczonego metodą statystyczną równania (1) dla warunków LGOM [29]. W rejonie tego wstrząsu wystąpiło 13 wstrząsów o energii $E \geq 1 \cdot 10^6$ J w okresie od 1 czerwca do 31 sierpnia 2008 roku. W tabeli 1 zestawiono wstrząsy o energii $E \geq 1 \cdot 10^6$ J w analizowanym rejonie ZG Rudna.

Tab. 1. Zestawienie wstrząsów o energii $E \geq 1 \cdot 10^6$ J w okresie od 1.06.2008 do 31.08.2008

Numer wstrząsu	Data	Godzina	Energia [J]
1	09.06.2008	18:57:00	$8,9 \times 10^6$ J
2	13.06.2008	06:13:33	$1,1 \times 10^8$ J
3	17.06.2008	19:58:37	$2,6 \times 10^7$ J
4	30.06.2008	22:09:25	$1,1 \times 10^6$ J
5	05.07.2008	01:19	$3,1 \times 10^6$ J
6	08.07.2008	13:27	$2,1 \times 10^6$ J
7	25.07.2008	22.49	$2,0 \times 10^6$ J
8	06.08.2008	14:26:35	$4,3 \times 10^7$ J
9	09.08.2008	06:30:12	$1,6 \times 10^6$ J
10	13.08.2008	05:46:09	$3,4 \times 10^6$ J
11	15.08.2008	00:47:11	$2,5 \times 10^7$ J
12	28.08.2008	06:36:44	$2,5 \times 10^6$ J
13	28.08.2008	13:35:20	$2,9 \times 10^6$ J

Na rysunku 8 a i b przedstawiono sytuację w dniu 6 lipca 2008 roku czyli w dniu wykonania radarowego obrazu satelitarnego przez satelitę ERS 2. Epicentra wstrząsów, które zaistniały przed 6 lipca 2008 zaznaczono przez wypełnienie.

Podstawiając do równania regresji (1) wartość $\lambda = 130^0$, a następnie $\lambda = 158^0$ (azymut pierwszego i drugiego najbliższego lineamentu) można wyliczyć wartość zmiennej zależnej β (azymut wektora KEW-a) wraz z granicznymi wartościami na zadanym poziomie ufności $\alpha = 0,01$. W tabeli 2 i 3 przedstawiono wyniki tych obliczeń.



Tab. 2. Przykład obliczania przewidywanej wartości zmiennej β dla pierwszego lineamentu

Obliczanie wartości zmiennej β		
Równanie regresji z granicami ufności 99%	Wartość zadana λ	Obliczona wartość β
$\beta = 31,1 + 0,88 \lambda$	130,0000	146,0815
Granica ufności -99%		118,2732
Granica ufności +99%		173,8897

Tab. 3. Przykład obliczania przewidywanej wartości zmiennej β dla drugiego lineamentu

Obliczanie wartości zmiennej β		
Równanie regresji z granicami ufności 99%	Wartość zadana λ	Obliczona wartość β
$\beta = 31,1 + 0,88 \lambda$	158,0000	170,8460
Granica ufności -99%		147,6162
Granica ufności +99%		194,0757

Na podstawie współrzędnych epicentrow kolejnych wstrząsów obliczono i zilustrowano na rysunku 8 b:

- azymut wektora kolejnych wstrząsów o numerach (2 i 3) = 122°
- azymut wektora kolejnych wstrząsów o numerach (2 i 8) = 118°
- azymut wektora kolejnych wstrząsów o numerach (2 i 11) = 155° .

W rejonie analizowanego epicentrum silnego wstrząsu znajdują się dwa najbliższe leżące lineamenty. Z dokonanej analizy wynika, że wartość azymutu wektora kolejnych wstrząsów

KEW-a, gdzie początkiem wektora było epicentrum wysokoenergetycznego wstrząsu o energii $E = 1,1 \times 10^8 \text{J}$, który wystąpił w dniu 13 czerwca 2008 roku w ZG Rudna (punkt 2 ; rys 8b), a końcem epicentrum wstrząsu o energii $E = 2,6 \times 10^7 \text{J}$ (punkt 3 na rys.8b) mieści się w przewidywanym przedziale wartości β (tab.2). Analiza azymutu drugiego wektora kolejnych wstrząsów KEW-a, gdzie początkiem wektora było epicentrum wysokoenergetycznego wstrząsu o energii $E = 1,1 \times 10^8 \text{J}$, który wystąpił w dniu 13 czerwca 2008 roku w ZG Rudna (punkt 2 ; rys 8 b), a końcem epicentrum wstrząsu o energii $E = 2,5 \times 10^7 \text{J}$ (punkt 11 na rys.8b) wykazała że jego wartość (155°) mieści się w obliczonym przedziale przewidywanych wartości azymutów (tab. 3).

4. Podsumowanie

W artykule pokazano możliwości praktycznego zastosowania informacji pozyskanych z obrazów satelitarnych do wyznaczania kierunków rozwoju wysokoenergetycznej sejsmiczności na obszarze Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego. Wykorzystano do tego celu statystyczny związek kierunków lineamentów z wektorem KEW-a (Kolejnych Epicentrow Wstrząsów, gdzie początkiem wektora jest epicentrum silnego wstrząsu). Otrzymane równanie regresji (1) dla LGOM [29] może być przydatne w przewidywaniu kierunku, w którym może wystąpić następny wysokoenergetyczny wstrząs, co zostało pokazane na przykładzie silnego wstrząsu o energii $E = 1,1 \times 10^8 \text{J}$, który wystąpił w dniu 13 czerwca 2008 roku w ZG Rudna. Wydaje się, że strefa nieciągłości po wstrząsie z dnia 6 czerwca miała skomplikowany charakter i pęknięcie mogło propagować w dwóch kierunkach. Te dwie strefy nieciągłości mogły się odwzorować w dwóch lineamentach i jak wykazała statystyczna analiza następne wysokoenergetyczne wstrząsy tworzyły się w tych dwóch kierunkach.

Wynika z tego wniosek, że równanie regresji (1) dla LGOM może być przydatne w przewidywaniu kierunku, w którym może wystąpić następny wysokoenergetyczny wstrząs. Do sformułowania ogólnych wniosków potrzebne byłoby przebadanie większej ilości silnych wstrząsów. Niemniej jednak analiza ta potwierdza możliwe odzwierciedlenie w lineamentach kierunku pęknięcia górotworu po wystąpieniu silnego wstrząsu indukowanego.

Literatura

- [1] Allen C.R., 1975: Geological criteria for evaluating seismicity. Geol. Soc. Am. Bull. v. 86, 1041–1057.
- [2] Arellano-Baeza A. A., Garcia R. V., and Trejo-Soto M., 2007: Use of high resolution satellite images for tracking of changes in the lineament structure, caused by earthquakes. Chile, <http://arxiv.org/abs/0706.1827v2>.
- [3] Bune V.I., Skarjatin V.D., Poljakowa T.P. Szirokowa J., 1977: Tectonic lineaments and distribution of foci of earthquakes with $M \geq 6.3$ in the central part of Alpine fold belt. Dokl.Acad. Sci. USSR vol.230, nr 6, 1310-1313.
- [4] Butra J., Mrozek K., Osadczyk T., Aktualny stan zagrożenia tąpnięciami w kopalniach KGHM Polska Miedź S.A. [W:] Geotechnika w budownictwie i górnictwie, XXX Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu i Geoinżynierii, Szklarska Poręba, 11-16 marca 2007, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2007, s.119-130.
- [5] Campbell R.H., 1976: Structural features related to earthquakes in Managua. Nicaragua and Cordoba. Mexico. Geol. Surv. Prof. Paper 929.
- [6] Ealy D.L., Mazurak R.D., Langrand E.L., 1979: A geological approach for predicting unstable roof and floor conditions in advance of mining. Min Congr J *Mar*:7-23.

- [7] Elifrits D., Barr D.J., Anghenbaugh N.B., 1983: Room and pillar coal mine subsidence. *International Journal of Mining Engineering*, 1, 295-314.
- [8] Gibowicz S.J., Domański B., Wiejacz P., 2000: Analiza wybranych wstrząsów górniczych z ZG Rudna w II półroczu 1999. Praca naukowa Inst. Geof. PAN, Warszawa.
- [9] Gibowicz S.J., Domański B., 2001: Spektra sejsmiczne i parametry ognisk wstrząsów górniczych. [W:] Dubiński J., Pilecki Z., Zuberek W.M. (red.): *Badania sejsmiczne w kopalniach.*, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków, 35-48.
- [10] Gibowicz S. J., Domański B. M., Wiejacz P. 2006: Seismic Doublets and Multiplets in Polish Copper Mines. [W:] A. Idziak, R. Dubiel, Publications of The Institute of Geophysics Polish Academy of Science., Warszawa, 15 –25.
- [11] Goszcz A., 1999: Elementy mechaniki skał oraz tąpnięcia w polskich kopalniach węgla kamiennego i miedzi. IGSMiE PAN, Kraków.
- [12] Goszcz A., 2004: Wybrane problemy zagrożenia sejsmicznego i zagrożenia tąpnięciami w kopalniach podziemnych. *Bibl. Szkoły Eksploatacji podziemnej*, Kraków.
- [13] Graniczny M., 1991: Możliwości wykorzystania fotolineamentów do oceny sejsmicznej zagrożenia terenu. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, nr 365, 5-46.
- [14] Jacobi, Robert D., 2002, Basement faults and seismicity in the Appalachian Basin of New York State, *in Neotectonics and Seismicity in the Eastern Great Lakes Basin*, R. H. Fakundiny, R. D. Jacobi, and C. F. M. Lewis (eds.): *Tectonophysics*, v. 353, 75-113.
- [15] Kłeczek Z., 2006: Zagrożenie tąpnięciami w polskich kopalniach węgla kamiennego i rud miedzi. *Materiały Sympozjum Warsztaty Górnicze 2006*, Wyd. IGSMiE PAN Kraków, 145-155.
- [16] Konopko W., 2007, Prognozowanie energii wstrząsów w kopalniach LGOM, [W:] *Geotechnika w budownictwie i górnictwie*, XXX Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej i Geoinżynierii, Szklarska Poręba, 11-16 marca 2007, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2007, 349-360
- [17] Liu J. G., Haselwimmer C. E., 2006: Co-seismic ruptures found up to 60 km south of the Kunlun fault after 14 November 2001, Ms 8.1, Kokoxili earthquake using LANDSAT-7 ETM + imagery. [W:] *International Journal of Remote Sensing*, Volume 27, Number 20, 4461-4470.
- [18] Marczak H. 1992: Zastosowanie modelu dylatacyjno-plastycznego do oceny stanu zagrożenia tąpnięciami. *Zesz. Nauk. AGH, s. Geod. Stosowana*, z. 9, 39-57.
- [19] Marczak H. 1997: Teoretyczne podstawy badania zagrożeń naturalnych w kopalniach metodami geofizycznymi. *Mat. Szk. Eksp. Podz. CPPGSMiE*.
- [20] Marczak H. 2002: The influence of strata and tectonics on the rockburst risk In *Polish mines. Seismogenic Process Monitoring* (Ogasarava M., Yanagidani T., Ando H. eds.). Balkema, Rotterdam, 51-61.
- [21] Marczak H, 2009: Zagadnienia odwrotne w modelowaniu wstrząsów górniczych. *Materiały Sympozjum Warsztaty Górnicze 2009*, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków, 188–196.
- [22] Martin EM, Carr F, Hendon G [1988]. Strata control advances at Jim Walter Resources. In: Peng SS, ed. *Proceedings of the Seventh International Conference on Ground Control in Mining*. Morgantown, WV: University of West Virginia, pp. 66–75.
- [23] Miller MS [1984]. Composite geologic and linear mapping for defining safe, high productivity mining in the Appalachian coal fields. In: *Proceedings of the 15th Annual Institute of Coal Mining, Health, Safety, and Research* (Blacksburg, VA), pp. 1–10
- [24] Peter D.C., 1990: Remote Sensing in: *SME Mining Engineering Handbook tom1*, Howard L., Hartman, 1992, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.
- [25] Peter, K. D., K. E. Kolm, J. S. Downey, T. C. Nichols, Jr., 1988, Lineaments: Significance, Criteria for Determination, and Varied Effects on Groundwater Systems- A Case History in the Use of Remote Sensing. in Johnson, A. I. and C. B. Petterson (editors), *Geotechnical Applications of Remote Sensing and Remote Data Transmission*. ASTM Special Publication 967, pp. 46-88.
- [26] Pilecka E., 2005: Wstępna analiza związku wysokoenergetycznej sejsmiczności indukowanej z lineamentami na obszarze GZW. *Miesięcznik WUG Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie*, 6 (130), 64-66.
- [27] Pilecka E., Piątkowska A., Stec K., Buła Z., Pilecki Z., Król M., 2006: Związek lineamentów z sejsmicznością indukowaną na terenach górniczych Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. *Wyd. IGSMiE PAN, Kraków*.

- [28] Pilecka E., 2007: Przykład wykorzystania lineamentów do analizy wysokoenergetycznej sejsmiczności na obszarze kopalń LGOM. Miesięcznik WUG Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie, 6 (154), 25-28.
- [29] Pilecka E., 2008: Indukowane podziemną eksploatacją górniczą wysokoenergetyczne wstrząsy górotworu a lineamenty na obrazach satelitarnych. Studia, Rozprawy, Monografie nr 144, Wyd. GSMiE PAN, Kraków, 147.
- [30] Pilecka E., Jaśkiewicz K., Piątkowska A., 2008: Analiza położenia lineamentów na zdjęciach satelitarnych w aspekcie zagrożenia sejsmicznego. (Dokumentacja Cuprum)
- [31] Rodríguez M.O.C., Córdoba Barba D., Sarachaga M.H., 2004 Main morphotectonic characteristics of Asturias, Spain Journal: Geofísica Internacional Year: 2004 Vol: 44 Issue: 1, 65-101.
- [32] Rukieh M., 2007: The Effects of Lineaments and Epicentres on Risk Reduction in Arabian Rift Zone, ISCRAM2007 Proceedings (Eds. B. Van de Walle, P. Burghardt and C. Nieuwenhuis), Delft, the Netherlands, 227-234.
- [33] Sharifkia, M., Dubey, C.S., Chaudhry, M., Sharma, B.K., Champatiray, P.K., 2006: Mapping Of Fault Rupture Of The 28 May 2004 Iran Earthquake (Mw= 6.2) Using Satellite Image. [W:] Journal of the Indian Society of Remote Sensing, Vol. 34, No. 4, 423-429.
- [34] Singh V. P., Singh R.P., 2005: Changes in stress pattern around epicentral region of Bhuj earthquake of 26 January 2001. [W:] Geophysical research letters, Volume 32, L24309.
- [35] Tajduś A., Cała M., 2002: O możliwości powstawania pionowych rozwarstwień stropu nad wyrobiskami komorowymi w LGOM. [W:] Geotechnika i budownictwo specjalne 2002: XXV Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu : Zakopane, 18–22 marca 2002, Wydawnictwo KGBiG AGH, 701–712.
- [36] Tajduś A., Cała M., 2003: Czy na podstawie rozwiązań analitycznych, opartych o teorię sprężystości, jesteśmy w stanie przedstawić wiarygodną prognozę stanu zagrożenia tąpnięciami? [W:] Tąpnięcia 2003 : X międzynarodowa konferencja naukowo-techniczna. 2–14.11.2003, Ustroń, Polska, Katowice GIG, 1–9.
- [37] Zorychta A., Burtan Z., Chlebowski A., 1999: Analityczne kryterium tąpnięcia dla eksploatacji prowadzonej w sąsiedztwie zaburzeń uskokowych. [W:] Eksploatacja rud miedzi w obszarach sąsiadujących z sejsmicznie aktywnymi zaburzeniami uskokowymi w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym, Szklarska Poręba 14–15 stycznia 1999, Akademia Górniczo-Hutnicza, KGHM Polska Miedź S.A., Centrum Badawczo-Projektowe Miedzi „Cuprum” Sp. z o.o., 37–51