

ELŻBIETA PILECKA*

Analiza kierunków lineamentów na obrazach satelitarnych w aspekcie występowania sejsmiczności indukowanej na terenie LGOM

Wprowadzenie

Rozwój techniki satelitarnej spowodował ogromne rozszerzenie zakresu możliwości obserwacji zjawisk zachodzących na kuli ziemskiej. Informacje rejestrowane przez satelity krążące po subpolarnych orbitach zsynchronizowanych z położeniem Słońca są zbierane przy pomocy skanerów. Obrazy mogą być wynikiem rejestracji promieniowania elektromagnetycznego odbitego lub emitowanego przez różnego rodzaju obiekty na Ziemi. Zarejestrowane obrazy satelitarne są następnie przetwarzane i interpretowane. Aktualnie rozwijają się techniki przetwarzania obrazów radarowych (Leśniak i in. 2007; Popiołek i in. 2006), które są szczególnie użyteczne w monitorowaniu terenów górniczych.

Jednym z elementów interpretowanych na obrazach satelitarnych są charakterystyczne linie – tzw. lineamenty. Lineamenty wyznaczone są z obrazów satelitarnych, w różnym zakresie częstotliwości takich jak: pasmo widzialne, podczerwień i pasma radarowe. Można je analizować pod kątem korelacji z budową geologiczno-tektoniczną. Lineamenty można także analizować w aspekcie sejsmiczności naturalnej lub indukowanej. Aktualnie w Polsce najsilniejsze wstrząsy indukowane generowane są przez eksploatację rud miedzi w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym. Analizę kierunków lineamentów z kierunkami wektorów: TVAA (którego początkiem było epicentrum wysokoenergetycznego wstrząsu o energii większej niż $E = 10^8$ J i końcem epicentrum wysokoenergetycznego wstrząsu o energii większej niż $E = 5,5 \cdot 10^5$ J ale mniejszej niż 10^8 J) i wektora TVAB (którego

* Dr inż., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków;
e-mail: pilecka@min-pan.krakow.pl

początkiem było epicentrum wysokoenergetycznego o energii większej niż $E = 5,5 \cdot 10^5$ J ale mniejszej niż 10^8 J, a końcem epicentrum wysokoenergetycznego wstrząsu o energii większej niż 10^8 J). zaprezentowano w niniejszym artykule na podstawie analizy statystycznej 42 najsilniejszych wstrząsów, które wystąpiły w LGOM w latach 1993–2006. Przedstawiono także jakościową analizę kierunków lineamentów na przykładzie bardzo silnego wstrząsu, który wystąpił 20 lutego 2002 roku w kopalni Rudna.

1. Lineamenty jako odzworowanie stref aktywnych sejsmicznie

W literaturze światowej istnieje wiele przykładów opisujących lineamenty jako odzworowania stref uskokowych aktywnych sejsmicznie. Zgodność lineamentów ze strukturami tektonicznymi potwierdzili Allen (1975) i Campbell (1976).

R.C. Jacobi (2002) analizował lineamenty w aspekcie rozkładu uskoków i sejsmiczności na terenie Appalachian Basin w stanie New York (Kanada). R.C. Jacobi (2002) zaobserwował, że intensywne strefy nieciągłości oraz wychodnie uskoków przebiegają wzdłuż lineamentów. Potwierdził także powiązanie głębokich stref uskokowych z lineamentami na powierzchni terenu. Przez nałożenie na mapę linementów i uskoków oraz zlokalizowanych epicentrow wstrząsów zaobserwował wzajemną przestrzenną korelację. Wiele uskoków jest w tym rejonie aktywnych sejsmicznie i można przypuszczać, że mechanizm tych wstrząsów polega na ruchu przesuwczym wzdłuż płaszczyzny uskokowej.

Związek pomiędzy lineamentami a trzęsieniami Ziemi na Półwyspie Iberyjskim został zbadany przez C.R. Rodriguez, Cordoba-Barba i Sarachaga (2004). Zastosowano kilka narzędzi metod badawczych w celu sejsmotektonicznej interpretacji podziału na megabloki strukturalne Półwyspu Iberyjskiego.

Okazało się, że największa aktywność sejsmiczna koncentruje się na wydzielonych ważniejszych lineamentach lub w bliskiej odległości od miejsc przecięcia lineamentów. Występowanie wstrząsów wzdłuż lineamentów można wytłumaczyć stanem koncentracji naprężeń w tych miejscach.

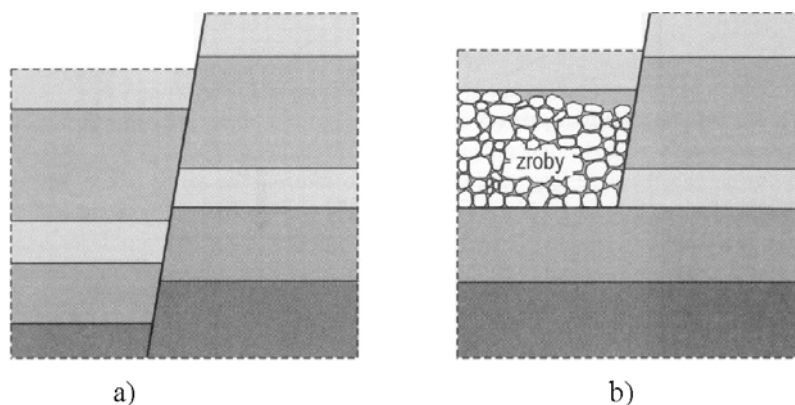
Interesującym przykładem analizy lineamentów w aspekcie sejsmiczności jest artykuł J.G. Liu i C.E. Haselwimmer (2006) opisujący pojawienie się nowego lineamentu jako odzwierciedlenia strefy pęknięcia po silnym wstrząsie tektonicznym zaistniałym 14.11.2001 roku 60 km od uskoku Kunlun (Chiny). Podobny przykład (Sharifikia i in. 2006) podano w odniesieniu do lineamentów z obrazów satelitarnych zaobserwowanych przed i po tektonicznym wstrząsie zaistniałym 28.05.2004 roku w Iranie. Po wstrząsie zaobserwowano nowy lineament, który powiązano z kierunkiem powierzchni pęknięcia masywu skalnego. V.P. Singh i R.P. Singh (2005) opisali zmiany kierunków lineamentów zaobserwowanych przed i po silnym trzęsieniu Ziemi 26.01.2001 w rejonie Bhuj w Indiach. Kierunek lineamentu wykazał dużą korelację z mechanizmem ogniska wstrząsu. Wykazał też zgodność kierunku lineamentu z kierunkiem regionalnych naprężeń w tym rejonie.

Na obszarze Polski występują w niewielkiej ilości wstrząsy naturalne oraz duże ilości wstrząsy indukowane działalnością górniczą o energii porównywalnej do małych trzęsień Ziemi. Metody sejsmologiczne stosowane do opisu i badania wstrząsów indukowanych wywodzą się z sejsmologii ogólnej.

W Polsce podjęto badania związku lineamentów z sejsmicznością w rejonie Bełchatowa (Graniczny 1991) oraz na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (Pilecka i in. 2006). Stwierdzono kierunkową zgodność występowania epicentrów wysokoenergetycznych wstrząsów z wyróżnionymi lineamentami, które korelują się z kierunkami dominujących struktur geologiczno-tektonicznych GZW (Pilecka i in. 2006).

Jednym z typowych mechanizmów wstrząsu wysokoenergetycznego indukowanego eksploatacją górniczą przyjmuje się mechanizm poślizgowy. A. Goszcz (2004) przedstawił mechanizm powstawania wstrząsu wysokoenergetycznego indukowanego eksploatacją górniczą tzw. mechanizm poślizgowy. Przy poślizgu następuje przeskok układu do nowego stanu równowagi. W tej sytuacji wydziela się energia sejsmiczna charakteryzującego się mechanizmem poślizgowym wstrząsu. Model rozwoju deformacji w naruszonym górotworze opisał także H. Marczak (2001).

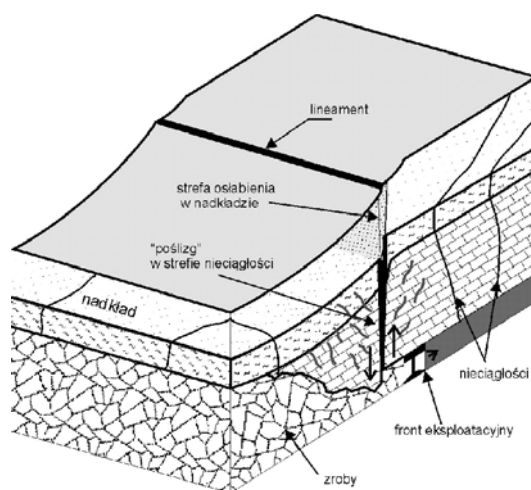
Przemieszczenia bloków skalnych w górotworze na skutek eksploatacji ma wiele podobieństwa do procesu tworzenia się uskoku normalnych (rys. 1). Zachowując odpowiednią skalę zjawiska, skokowe poślizgi po spowodowanym robotami górniczymi pęknięciu można traktować jako zjawisko analogiczne do odmładzania się uskoku. Mechanizm taki potwierdzają także badania wykonane w jednej z kopalń RPA (Ortlepp 2001).



Rys. 1. Uskok normalny (a) i uskok „górnicy” (b) powstały na granicy zrobów (Goszcz 2004)

Fig. 1. Normal fault (a) and “mining” fault (b) resultant on the border of goafs (Goszcz 2004)

Na rysunku 2 przedstawiono model powstawania lineamentu na powierzchni terenu spowodowany eksploatacją górniczą. Wytworzone przez eksploatację pęknięcie w górotworze przemieszcza się ku powierzchni terenu, zaznaczając się w postaci lineamentu.



Rys. 2. Prawdopodobny mechanizm powstawania lineamentu spowodowanego eksploatacją górnictw (Pilecka i in. 2006)

Fig. 2. Lineament which appears as a result of seismicity during mining exploitation (Pilecka et al. 2006)

2. Analiza kierunków lineamentów na przykładzie sejsmiczności indukowanej LGOM

Rozkład wstrząsów górotworu w kopalniach LGOM wskazuje na ich bimodalność (Konopko 2007). Wstrząsy o energii sejsmicznej $\leq 10^7$ J generowane są przez bieżąco prowadzone roboty górnictw, natomiast wstrząsy o energii $> 10^7$ J prawdopodobnie są spowodowane regionalnym zaburzeniem równowagi górotworu na skutek dotychczas wykonanych robót górnictw. W oparciu o badania statystyczne ilości i energii wstrząsów górotworu z lat 1990–2005 można stwierdzić, że zależność liczby wstrząsów od ich energii odbiega od prostoliniowej zależności Guttenberga-Richtera. Dla warunków LGOM można ją opisać równaniem (Konopko 2007):

$$\text{Log } n_w = -0,125(\text{log } E)^2 + 1,0082 \text{ Log } E + 0,8484 \quad (1)$$

Autor stwierdził także, że zależność (1) można opisać dwoma modami:

— dla energii $\leq 10^7$ J: $n_w = -302,92 \text{ log } E + 2138,7$

— a dla energii $> 10^7$ J: $n_w = -23,21 \text{ log } E + 214,27$

W kopalniach LGOM badania mechanizmów silnych wstrząsów dowiodły, że dominującym jest mechanizm ścinający (uskok normalny ze składową przesuwczą) (Gibowicz i in. 2000; Gibowicz, Domański 2001). Jest to mechanizm podobny do naturalnych trzęsień Ziemi w strefach uskokuwanych.

Badając pary wstrząsów o tej samej wielkości, występujących w pobliżu siebie w krótkim odstępie czasu Gibowicz i in. (2006) 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 spekań w poszczególnych oddziałach kopalń.

Poniżej przedstawiono analizę kierunków lineamentów w aspekcie sejsmiczności indukowanej. Przeprowadzono ją w dwóch etapach: analizy jakościowej na przykładzie bardzo silnego wstrząsu, który wystąpił w LGOM 20 lutego 2002 roku o sile $1,5 \cdot 10^9$ J porównywalnej w małym trzęsieniu Ziemi, oraz metodą analizy statystycznej dla 42 najsilniejszych wstrząsów, które wystąpiły w LGOM w latach 1993–2006.

2.1. Jakościowa analiza kierunków lineamentów na przykładzie wysokoenergetycznego wstrząsu z dnia 20 lutego 2002 roku

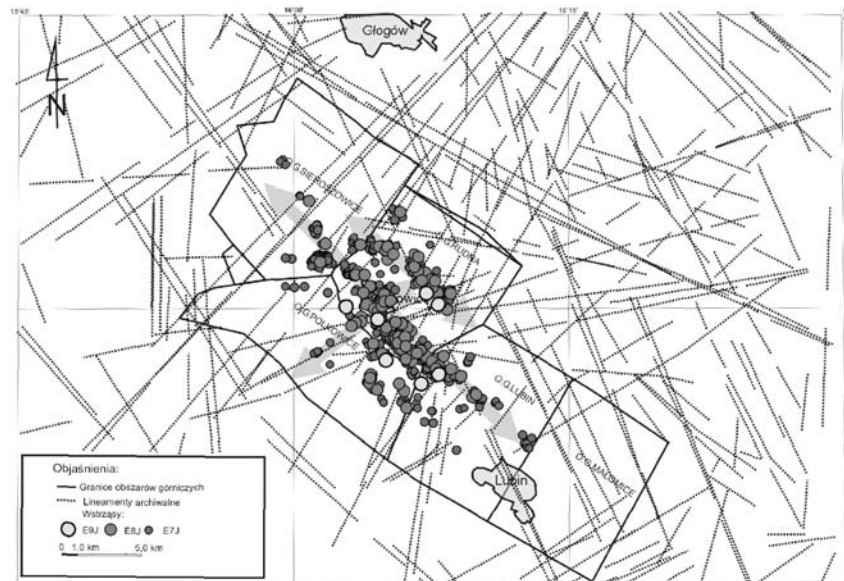
W dniu 20 lutego 2002 roku wystąpił na obszarze górniczym kopalni Rudna wysokoenergetyczny wstrząs o energii $E = 10^9$ J. Wyznaczono lineamenty z obrazu satelitarnego satelity ERS2 z dnia 14.04.2002 roku czyli po omawianym wstrząsie i porównano z lineamentami archiwalnymi dla LGOM. Całą analizę przeprowadzono w kontekście położenia epicentrow wysokoenergetycznych wstrząsów.

Lineamenty wyznaczone ze zdjęć satelitarnych analizowano w następujących wersjach:

- lineamenty archiwalne dostępne w bazie danych PIG-u w Warszawie i lineamenty ze zdjęcia satelitarnego Landsat z 1999 roku,
- lineamenty wyznaczone z obrazu radarowego z dnia 14.04.2002 r.

Na rysunku 3 przedstawiono lineamenty archiwalne z naniesionymi epicentrami wstrząsów w klasie od energii $\geq 10^7$ J. Analizując rozkład epicentrow wstrząsów można zauważyć, że układają się one liniowo w pewne „skupiska”.

Generalnie epicentra wysokoenergetycznych wstrząsów na obszarze górniczym LGOM-u są rozłożone wzdłuż linii zgodnej z kierunkiem NW-SE. Jest to dominujący kierunek lineamentów na tym obszarze co uwidacznia się na diagramie kierunkowym lineamentów archiwalnych (rys. 5). Kierunek NW-SE jest też kierunkiem głównych struktur tektonicznych LGOM-u takich jak: na południu uskoku środkowej Odry, na północy uskoku śląsko-lubuskiego. Ponadto kierunek ten wykazuje większość uskoków stwierdzonych robotami górniczymi takich jak: uskok Rudnej Głównej, uskoki: Południowy, Środkowy i Główny Lubina. W pewnych miejscach epicentra wstrząsów układają się liniowo zgodnie z kierunkiem SW-NE. Lineamenty o takim kierunku prawdopodobnie mogą być związane ze strefą uskoku Biedrzychowej. Na diagramie kierunkowym lineamentów archiwalnych (rys. 5) kierunek SW-NE zaznacza się jako drugi dominujący kierunek na obszarze LGOM. Te ogólnie stwierdzone prawidłowości mogą być w szczególnych przypadkach zaburzone.



Rys. 3. Mapa lineamentów archiwalnych na tle sejsmiczności indukowanej od $E \geq 10^7$ J w latach 1993–2006 na obszarze kopalń LGOM

Fig. 3. Lineaments in LGCD and epicenters of high-energy tremors ($E \geq 10^7$ J) in 1993–2006



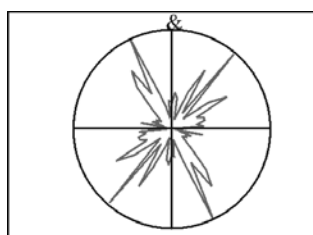
Rys. 4. Mapa lineamentów z obrazu radarowego z dnia 14.04.2002 r. na tle sejsmiczności indukowanej od $E \geq 10^8$ J w 2002 roku na obszarze kopalń LGOM

Fig. 4. Radar lineaments in LGCD and epicenters of high-energy tremors ($E \geq 10^8$ J) in 2002 year

W punkcie 2 opisano przypadki zmiany kierunków lineamentów po trzęsieniach Ziemi. W mniejszej skali można to także zauważyć na obszarach sejsmiczności indukowanej. Na rysunku 4 przedstawiono lineamenty wyinterpretowane z satelitarnego obrazu radarowego z dnia 14.04.2002 r. z naniesionymi epicentrami wstrząsów, które wystąpiły w 2002 roku o energii $E \geq 10^8$ J.

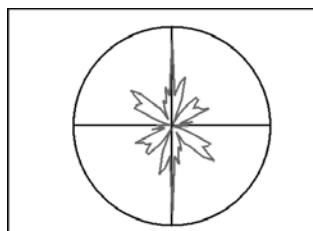
Diagram kierunkowy lineamentów z obrazu radarowego przedstawiono na rysunku 6.

Można zauważyć, że dominujące kierunki lineamentów uległy zmianie. Pojawił się kierunek N-S i kierunki zbliżone do niego. Wyjaśnienie tego zjawiska może istnieć w mechanizmie pęknięcia górotworu w wyniku wysokoenergetycznego wstrząsu, który miał miejsce



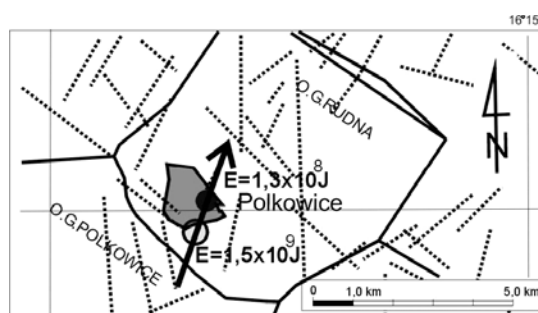
Rys. 5. Diagram kierunkowy lineamentów archiwalnych dla obszaru LGOM

Fig. 5. Rose diagram for LGCD area (archive lineaments)



Rys. 6. Diagram lineamentów z obrazu radarowego z dnia 14.04.2002 r. dla obszaru LGOM

Fig. 6. Rose diagram for LGCD area taken out of radar image – April 14, 2002



Rys. 7. Prawdopodobny kierunek propagacji strefy nieciągłości po wysokoenergetycznym wstrząsie z dnia 20.02.2002 r. o energii $E = 1,5 \cdot 10^9$ J

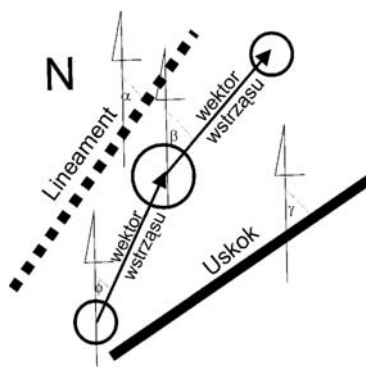
Fig.7. Probable direction of discontinuity zone propagation after high-energy tremor from 20.02.2002 yr. with energy $E = 1,5 \cdot 10^9$ J

20.02.2002 roku. Utworzona strefa nieciągłości miała prawdopodobnie kierunek zbliżony do N-S i następne wstrząsy wysokoenergetyczne powinny tworzyć się w tym kierunku. Potwierdzeniem tego faktu jest rysunek 7 gdzie przedstawiono wektor przechodzący przez epicentrum wysokoenergetycznego wstrząsu z dnia 20.02.2002 roku o energii $E = 1,5 \cdot 10^9$ J i epicentrum kolejnego, następnego wysokoenergetycznego wstrząsu z dnia 30.07.2002 roku o energii $E = 1,3 \cdot 10^8$ J.

Z obliczeń na podstawie współrzędnych epicentrow tych dwóch wstrząsów, że kierunek prawdopodobnej strefy pęknięcia ma azymut 18° (TVAA) i jest zgodny z kierunkiem lokalnego lineamentu (rys. 4) oraz z kierunkiem dominującym na diagramie lineamentów w dniu 14.04.2002 r. (rys. 6).

2.2. Statystyczna analiza azymutów wysokoenergetycznych wstrząsów

Przeprowadzono statystyczną analizę w celu określenia siły związku między wysokoenergetyczną sejsmicznością indukowaną a lineamentami. Korelacja oznacza związek między dwoma cechami, a współczynnik korelacji – liczbową miarę siły tego związku. Siła związku między analizowanymi cechami wyrażona jest w postaci wartości bezwzględnej współczynnika korelacji. Analizę przeprowadzono dla 42 przypadków wstrząsów o energii $E > 10^8$ J, które wystąpiły w latach 1993–2006 na obszarze LGOM. W badaniach wykorzystano bazę archiwalnych lineamentów PIG i uskoki na obszarze kopalń LGOM (Kłapciński 1984; Salski 1996). Do analizy przyjęto cztery zmienne przedstawione na rysunku 8.



Rys. 8. Zmienne wykorzystane w statystycznej analizie związku między wysokoenergetyczną sejsmicznością a lineamentami

α – azymut najbliższego lineamentu, β – azymut wektora (TVAA – tremor vector azimuth after), którego początkiem było epicentrum bardzo silnego wstrząsu o energii co najmniej $E \geq 10^8$ J, a końcem było epicentrum silnego wstrząsu o energii co najmniej $E \geq 5,5 \cdot 10^5$ J, γ – azymut najbliższego uskoku, ϕ – azymut wektora (TVAB – tremor vector azimuth before), którego początkiem było epicentrum silnego wstrząsu o energii co najmniej $E \geq 5,5 \cdot 10^5$ J, a końcem było epicentrum bardzo silnego wstrząsu o energii co najmniej $E \geq 10^8$ J

Fig. 8. Variables applied to statistical analysis of lineament dependence on high energy seismicity

Zastosowano typowe analizy statystyczne: badanie rozkładu zmiennych losowych, analizę korelacji, testowanie hipotez statystycznych. Do zbadania normalności rozkładu parametrów zastosowano Test W Shapiro-Wilka. Z przeprowadzonej analizy pokazała, że tylko zmienna: azymut wektora wstrząsów przed silnym wstrząsem ma rozkład normalny z prawdopodobieństwem 95%. Pozostałe zmienne nie mają rozkładu normalnego. Jest to w przypadku uskoków i lineamentów zgodne z rzeczywistością, gdyż istnieją uprzywilejowane kierunki uskoków oraz lineamentów na terenie LGOM. Zmienna która także nie wykazała zgodności z rozkładem normalnym to azymut wektora wstrząsów po silnym wstrząsie (TVAB). Do obliczeń zastosowano współczynnik korelacji R Spearmana. W tabeli 1 podano wartości obliczonych współczynników korelacji.

TABELA 1

Współczynniki korelacji zmiennych

TABLE 1

Correlation ratio of variables

Współczynniki korelacji R Spearmana Poziom ufności $p < 0,05$				
zmienna	(TVAB)	(TVAA)	azymut najbliższego lineamentu	azymut najbliższego uskoku
(TVAB)	1,000	0,298	0,114	0,248
(TVAA)	0,298	1,000	0,608	0,147
Azymut najbliższego lineamentu	0,114	0,608	1,000	0,037
Azymut najbliższego uskoku	0,248	0,147	0,037	1,000

Przeprowadzona analiza korelacji wykazała jedyną istotną zależność między azymutem lineamentu a azymutem wektora wstrząsów po silnym wstrząsie. Współczynnik korelacji Spearmana wynosi $R = 0,608995$ z prawdopodobieństwem 95%. Zmienność kierunku wektora wstrząsu po silnym wstrząsie związana jest w 37 % ze zmiennością najbliższego lineamentu. Jest to wynik taki sam jak w przypadku korelacji danych w GZW (Pilecka 2007). **Ze statystycznej analizy wynika, że następny wstrząs po silnym wstrząsie jest silnie ($R = 0,6$) związany z lineamentem.**

Podsumowanie

W artykule przedstawiono analizy kierunków lineamentów w aspekcie wysokoenergetycznej sejsmiczności w LGOM. Zaprezentowano sposób wykorzystania nowoczesnego, dostępnego materiału jakim są obrazy satelitarne, które mogą być wykorzystane do obser-

wacji terenów górniczych podlegających szczególnym zmianom na skutek eksploatacji w warunkach wysokoenergetycznej sejsmiczności indukowanej.

Analiza kierunków lineamentów na przykładzie bardzo silnego wstrząsu, który wystąpił w LGOM 20.02.2002 roku o sile $1,5 \cdot 10^9$ J wykazała zmianę kierunków lineamentów po wystąpieniu tego wstrząsu w porównaniu do dominujących kierunków lineamentów archiwalnych. Badanie kierunków lineamentów dla wstrząsu z dnia 20.02.2002 roku przeprowadzono na zbiorze lineamentów radarowych z obrazu satelitarnego uzyskanego z satelity ERS2 z dnia 14.04.2002 roku. Wyniki badań wskazują na zaznaczenie się płaszczyzny rozrywu w postaci lineamentu po wysokoenergetycznym wstrząsie o energii $E = 1,5 \cdot 10^9$ J.

Wyniki przeprowadzonych badań pokazują, że istnieje statystyczny związek między lineamentami na obrazach satelitarnych a wysokoenergetyczną sejsmicznością indukowaną. Charakter tej zależności polega na zgodności położenia i kierunków lineamentów z wektorami epicentrow wstrząsów. Badania pokazały istotną zależność (współczynnik korelacji $R = 0,6$) azymutu lineamentu z azymutem (TVAA) wektora, którego początkiem był silny wstrząs. Może to wskazywać na kierunek płaszczyzny rozrywu po silnym wstrząsie i możliwość następných wstrząsów w tym kierunku. Zależność ta może potwierdzać geomechaniczną interpretację mechanizmu poślizgowego wysokoenergetycznego wstrząsu. Płaszczyzna rozrywu takiego silnego wstrząsu może się ujawnić w postaci lineamentu.

Interpretacja zdjęć satelitarnych pod kątem lineamentów i badanie ich kierunków na terenach górniczych może mieć znaczenie dla celów rozpoznania zagrożenia wysokoenergetycznymi wstrząsami górniczymi, które towarzyszą podziemnej eksploatacji. Nowoczesna technika może być pomocna w poznawaniu procesów zachodzących w górotworze.

LITERATURA

- Allen C.R., 1975 – Geological criteria for evaluating seismicity. *Geol. Soc. Am. Bull.* v. 86.
- Campbell R.H., 1976 – Structural features related to earthquakes in Managua, Nicaragua and Cordoba, Mexico. *Geol. Surv. Prof. Paper* 929.
- Gibowicz S.J., Domański B., Wójcisz P., 2000 – Analiza wybranych wstrząsów górniczych z ZG Rudna w II półroczu 1999. *Praca naukowa Inst. Geof. PAN, Warszawa.*
- Gibowicz S.J., Domański B., 2001 – Spektre sejsmiczne i parametry ognisk wstrząsów górniczych. [W:] Dubiński J., Pilecki Z., Zuberek W.M. (red.): *Badania sejsmiczne w kopalniach.*, Kraków Wyd. IGSMiE PAN, 35–48.
- Gibowicz S. J., Domański B.M., Wójcisz 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.
- Goszc A., 2004 – Wybrane problemy zagrożenia sejsmicznego i zagrożenia tąpnięciami w kopalniach podziemnych. *Bibl. Szkoły Eksploatacji podziemnej, Kraków.*
- Graniczny M., 1991 – Możliwości wykorzystania fotolineamentów do oceny sejsmicznej zagrożenia terenu. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, nr 365, 5–46.
- 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.

- 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, 349–360.
- Kłapczyński J., i in. 1984 – Atlas obszaru miedzionośnego (monoklina przedsudecka) 1: 50 000, Wydawnictwo Śląsk, Katowice.
- Leśniak A., Porzycka S., Graniczny M., 2007 – Detekcja długookresowych, pionowych przemieszczeń gruntu na terenach górniczych kopalń Zagłębia Dąbrowskiego z zastosowaniem technologii PSInSAR. WUG (Katowice), Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie, 6(154)/2007, 30–32.
- 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.
- Marcak H., 2001 – Modele rozwoju deformacji górotworu poprzedzającego tąpnięcie [w] Dubiński J., Pilecki Z., Zuberek W.M. (red.), Badania geofizyczne w kopalniach, Wyd. PAN IGSMiE, Kraków, 49–57.
- Ortlepp W.D., 2001 – Thoughts on the rockburst source mechanism based on observations of the mine-induced shear rupture. Proc. Int. Symp. Rockbursts and seismicity in mines, Wyd. The South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, 43–51.
- 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.
- Pilecka E., 2007 – Statistical analysis of the relation between locations of high energy epicenter tremors and lineaments in areas of the Upper Silesian Basin. Gosp. Surow. Min., t. 23, z. 4, Wyd PAN IGSMiE, Kraków, 101–109.
- Popiołek E., Marcak H., Krawczyk A., 2006 – Możliwości wykorzystania satelitarnej interferometrii radarowej In SAR w monitorowaniu zagrożeń górniczych. WUG (Katowice), Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie, 6(142)/2006, 16–19.
- Rodríguez M.O.C., Córdoba Barba D., Sarachaga M.H., 2004 – Main morphotectonic characteristics of Asturias, Spain Journal: Geofísica Internacional. Vol. 44, Issue 1, 65–101.
- Salski W., 1996 – Tektonika złoża [W:] Piestrzyński A. (red.): Monografia KGHN Polska Miedź S.A., Wyd. CBPM „Cuprum” Sp. z o.o., Wrocław, 141–155.
- Sharifikia 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.

ANALIZA KIERUNKÓW LINEAMENTÓW NA OBRAZACH SATELITARNYCH W ASPEKTCIE WYSTĘPOWANIA SEJSMICZNOŚCI INDUKOWANEJ NA TERENIE LGOM

Słowa kluczowe

Lineamenty, wstrząsy indukowane eksploatacją górnictwem

Streszczenie

W artykule pokazano wyniki analizy kierunków lineamentów w aspekcie wysokoenergetycznej sejsmiczności indukowanej na przykładzie wstrząsów w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym. Przewiedziono interpretację lineamentu jako odwzorowania strefy aktywnej sejsmicznie. Analizę kierunków lineamentów przeprowadzono w dwóch etapach: analizę jakościową na przykładzie bardzo silnego wstrząsu, który wystąpił w LGOM 20.02.2002 roku o energii $E = 1,5 \cdot 10^9$ J porównywalnej z małym trzęsieniem Ziemi, oraz analizę statystyczną dla 42 wysokoenergetycznych wstrząsów o energii $E \geq 10^8$ J. Badanie kierunków lineamentów dla wstrząsu z dnia 20.02.2002 roku przeprowadzono na zbiorze lineamentów radarowych z obrazu zarejestrowanego satelitą ERS2 w dniu 14.04.2002 roku. Wyniki badań wskazują na odzwierciedlenie się w postaci lineamentu płaszczyzny rozrywu po wysokoenergetycznym wstrząsie o energii $E = 1,5 \cdot 10^9$ J.

Do analizy statystycznej wybrano cztery parametry do obliczeń. Były to: azymut lineamentu, azymut uskoku, azymut wektora (TVAA) – którego początkiem było epicentrum wysokoenergetycznego wstrząsu o energii większej niż $E = 10^8$ J i końcem epicentrum wysokoenergetycznego wstrząsu o energii większej niż $E = 5,5 \cdot 10^5$ J ale mniejszej niż 10^8 J – azymut wektora (TVAB), którego początkiem było epicentrum wysokoenergetycznego wstrząsu o energii większej niż $E = 5,5 \cdot 10^5$ J ale mniejszej niż 10^8 J, a końcem epicentrum wysokoenergetycznego wstrząsu o energii większej niż 10^8 J. Wyniki przeprowadzonych badań pokazują, że istnieje statystyczny związek między kierunkami lineamentów na obrazach satelitarnych a wysokoenergetyczną sejsmicznością indukowaną. Charakter tej zależności polega na zgodności położenia i kierunków lineamentów z wektorami epicentrow wstrząsów. Badania pokazały istotną zależność (współczynnik korelacji $R = 0,6$) azymutu lineamentu z azymutem wektora (TVAA) po wysokoenergetycznym wstrząsie. Zależność ta może potwierdzać geomechaniczną interpretację mechanizmu poślizgowego wysokoenergetycznego wstrząsu. Płaszczyzna rozrywu takiego silnego wstrząsu może się ujawnić w postaci lineamentu. Interpretacja zdjęć satelitarnych pod kątem lineamentów i badanie ich kierunków na terenach górniczych może mieć znaczenie dla celów rozpoznania zagrożenia wysokoenergetycznymi wstrząsami górniczymi, które towarzyszą podziemnej eksploatacji.

AN ANALYSIS OF LINEAMENT DIRECTIONS ON SATELLITE IMAGES IN CONTEXT OF THE OCCURRENCE OF AN INDUCED SEISMICITY IN THE LEGNICA – GŁOGÓW COPPER DISTRICT (LGCD)

Key words

Lineaments, mining induced tremors

Abstract

The results of lineament directions analysis from a point of view of a high-energy induced seismic activity in the Legnica-Głogów Copper District (LGCD) are presented in the article. There is presented an interpretation of a lineament as a projection of a seismically active zone. An analysis of lineament directions carried in two stages out: qualitative analysis with an example of an extensive seismic tremor which has occurred in the Legnica-Głogów Copper District (LGCD) 20 February 2002, $E = 1.5 \cdot 10^9$ J with energy comparable to small earthquake, as well as statistic analysis for 42 events of the high-energy underground tremors $E \geq 10^8$ J. The research of lineament directions for an underground tremor dated 20 February 2002 has been carried out on a set of radar lineaments from a satellite image ERS2 dated 14 April 2002. The research findings indicate to projection in the form of a lineament of the disruption plane after the high-energy underground tremor $E = 1.5 \cdot 10^9$ J.

There was chosen four parameters for a statistic analysis. There were: azimuth of lineament, azimuth of an earthquake fault, vector azimuth (TVAA), (the origin of which was an epicenter of the high-energy underground tremor with energy greater than $E = 10^8$ J and the terminus was an epicenter of the high-energy underground tremor with energy greater than $E = 5.5 \cdot 10^5$ J but smaller than $E = 10^8$ J), vector azimuth (TVAB), (the origin of which was an epicenter of the high-energy underground tremor with energy greater than $E = 5.5 \cdot 10^5$ J but smaller than $E = 10^8$ J, and the terminus was an epicenter of the high-energy underground tremor with energy greater than $E = 10^8$ J). The results of researches carried out indicate that there is a statistical relationship between lineaments on satellite images and high-energy induced seismic activity. The character of this relationship consists in conformity of position and lineament directions with vectors of epicenters of the underground tremors. The researches have shown a significant dependence (correlation coefficient $R = 0.6$) of an azimuth of lineament with vector azimuth (TVAA) after the high-energy underground tremor. This relationship may confirm a geomechanical interpretation of the sliding mechanism of the high-energy underground tremor. The disruption plane of this extensive tremor may manifest itself in the form of lineament. The interpretation of satellite images at an angle of lineaments and research of their directions on the mining areas may have meaning for the purposes of recognition of hazards with reference to the high-energy mining tremors which accompany underground exploitation.