

# Skomplikowany mechanizm pęknięcia górotworu w warunkach działania kopalni głębinowej na podstawie zjawiska sejsmicznego z ZG „Rudna” w Polkowicach

The complex source mechanism of induced seismic event occurred in the underground copper mine Rudna Polkowice, Poland



Mgr Adam Talaga<sup>\*)</sup>



Mgr inż. Eugeniusz Koziarz<sup>\*)</sup>



Dr Łukasz Rudziński<sup>\*\*)</sup>

**Treść:** Sejsmiczność indukowana działalnością górnictwem związana jest z występowaniem specyficznych zagrożeń. Do największych z nich należą uszkodzenia wyrobisk górniczych, skutkujące niebezpieczeństwem dla pracowników oraz znajdującej się w obszarze źródłowym infrastruktury. Obecnie nie istnieje skuteczna metoda prognozowania zjawisk sejsmicznych odpowiedzialnych za tego typu zagrożenie. Wykorzystując metody sejsmologiczne możemy jednak zrozumieć fizyczną naturę procesów ich powstawania. Jedną z metod jest analiza mechanizmów wstrząsów górniczych. W artykule zaprezentowano możliwy proces pęknięcia górotworu towarzyszący silnemu zjawisku sejsmicznemu, zaobserwowanemu na terenie kopalni miedzi „Rudna” w Polkowicach. Wykorzystując zapisy sejsmiczne z dwóch niezależnych sieci sejsmologicznych zaproponowaliśmy możliwe wyjaśnienie obserwowanych skutków wstrząsu górotworu.

**Abstract:** Seismicity induced by mining workings is associated with many hazards. Seismicity is the greatest threat and corresponding rock burst phenomena linked with possible tunnels destructions in the vicinity of the source of the tremor. Nowadays there is no effective method which allows to forecast such kind of hazardous events. Using seismological methods however, we are ready to understand the physical properties of the seismic sources. One of the method is an analysis of the seismic source mechanisms of tremors induced by mining. This paper deals with this issue. We present the possible complex process of rock fracture inside the source of the strong seismic event occurred in Rudna copper mine in Polkowice, Poland. Based on seismic signals recorded by two independent seismological networks we suggest a possible explanation of the effects observed inside mining panels.

## Słowa kluczowe:

sejsmologia górnicza, mechanizmy ognisk zjawisk sejsmicznych, inwersja tensora momentu sejsmicznego

## Key words:

mining seismology, focal mechanism, seismic moment tensor inversion

## 1. Wprowadzenie

Jednym z podstawowych zagrożeń naturalnych występujących na obszarach działalności górniczej jest sejsmiczność wzbudzana pracami wydobywczymi. Z zagrożeniem tym w sposób ciągły mamy do czynienia na terenie Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (LGOM), gdzie w trzech Zakładach Górniczych (Lubin, Polkowice – Sierszowice, Rudna) prowadzone jest głębinowe wydobywanie rud miedzi (rys. 1). Na terenie ZG „Rudna” aktywność sejsmiczna jest stosunkowo wysoka, przy czym corocznie rejestrowane jest ponad 1000 zjawisk sejsmicznych o energiach równych

lub większych od  $10^3$  J, co odpowiada magnitudzie  $M \sim 0.9$ . Najsilniejsze z rejestrowanych zjawisk osiągają energię  $10^9$  J ( $M \sim 3.8$ ). Aktywność sejsmiczna monitorowana jest w sposób ciągły przez Kopalnianą Stację Geofizyki Górniczej (Koziarz i Szłapka 2010). Największym zagrożeniem związanym z sejsmicznością na terenach górniczych jest nie tyle samo zjawisko, co powiązane z nim skutki zaistniałe w wyrobiskach oraz na powierzchni. Ze względu na skutki w wyrobiskach zjawisko sejsmiczne kwalifikowane jest jako wstrząs, odprężenie górotworu lub tąpnięcie. Z uwagi na swoją naturę, na obecną chwilę niemożliwe jest pełne prognozowanie tego typu zagrożeń. Jednym z elementów przyczyniających się do poznania natury sejsmiczności w kopalniach są badania prowadzone metodami sejsmologii górnicznej. Do podstawowo-

<sup>\*)</sup> KGHM Polska Miedź S.A., Zakłady Górnicze Polkowice

<sup>\*\*)</sup> Instytut Geofizyki PAN, Warszawa

wych badań w tej dziedzinie należą: lokalizacja zjawiska oraz określenie jego siły (energia i/lub magnituda wstrząsu). Do zrozumienia procesów zachodzących w źródle potrzeba jednak dodatkowych, bardziej zaawansowanych narzędzi sejsmologii. Jednym z nich, z powodzeniem stosowanym w praktyce sejsmologii górniczej jest wyznaczanie mechanizmu ogniska za pomocą pełnego tensora momentu sejsmicznego – MT od ang. *moment tensor* (Lizurek, Wiejacz 2011, Rudziński 2013, Stec 2009, Wiejacz 1992, Wojtecki, Dzik, 2013). Powszechnie przyjmuje się, że rozwiązanie mechanizmu za pomocą MT w sposób całościowy opisuje siły działające w punktowym źródle sejsmicznym, co pozwala również na interpretacje możliwych ognisk zjawisk sejsmicznych obserwowanych w sejsmologii górniczej (Hasegawa i in. 1989). Rozwiązania mechanizmu ogniskowego wstrząsu pomagają w zrozumieniu ryzyka sejsmicznego oraz wyznaczeniu wpływu danego zjawiska na rejestrowane efekty powierzchniowe, co może mieć zasadnicze znaczenie w przypadku obszarów, na których prowadzone są prace górnicze.

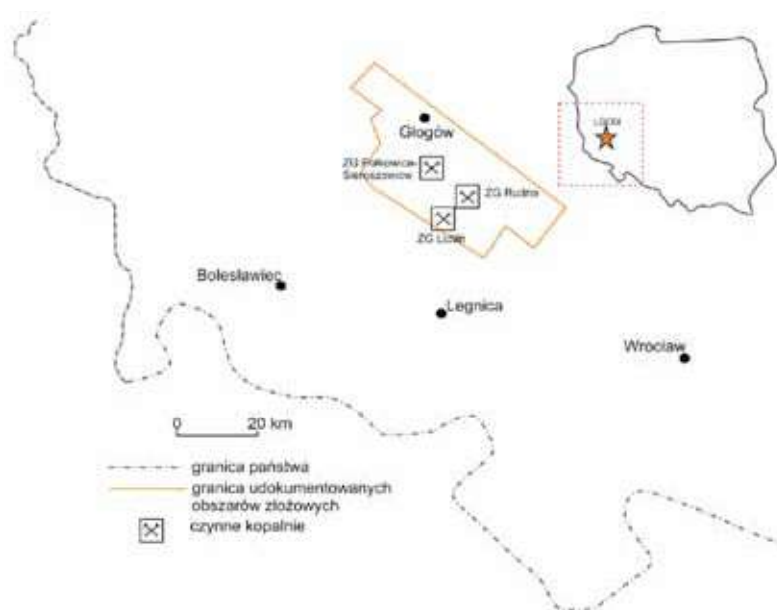
Największe ryzyko dla prowadzenia ruchu zakładu górniczego niosą ze sobą zjawiska wysokoenergetyczne. Wstrząsy takie rejestrowane są nie tylko przez lokalne sieci sejsmologiczne kopalń, lecz również w skali regionalnej na permanentnych stanowiskach sejsmologicznych wyposażonych w czułe sejsmometry szerokopasmowe. Pozwala to na komplementarne użycie zapisów sejsmicznych do szczegółowej analizy możliwego procesu pęknięcia górotworu (Rudziński, Lizurek 2015, Rudziński i in. 2016). W niniejszym opracowaniu podjęliśmy się próby analizy silnego zjawiska sejsmicznego zarejestrowanego w dniu 08.07.2015 roku o godzinie 08.53 czasu lokalnego (06.53 UTC). W badaniach wykorzystujemy zarówno lokalną krótkookresową sieć sejsmologiczną ZG „Rudna”, jak również dane z sieci sejsmometrów szerokopasmowych zlokalizowanych wokół LGOM. Wykorzystując dotychczasową wiedzę, przedstawiamy prawdopodobny przebieg powstawania zjawiska. Uzyskane wyniki sugerują możliwość wystąpienia skutków w wyrobiskach górniczych, w szczególności zaś wypiętrzenie spągu (Rudziński, Lizurek 2015). Zjawisko zostało zakwalifikowane przez służbę ds. tapani ZG „Rudna” jako odprężenie z obsypaniem i urobieniem ociosów oraz wypiętrzeniem spągu do wysokości 1m.

Obszar skutków przesunięty jest w stosunku do epicentrum na kierunek ENE (azymut 67,5 stopnia). W pracy wyjaśniamy możliwą przyczynę obserwowanych skutków.

## 2. Krótkookresowa sieć sejsmiczna ZG „Rudna” – lokalizacja, mechanizm ogniska

Sejsmiczność na terenie ZG „Rudna” w sposób ciągły monitorowana jest przez podziemną sieć sejsmometrów. Sieć sejsmologiczna składa się z 47 (rys. 2.) pionowych, krótkookresowych (1 – 100Hz) sejsmometrów Willmore MkIII produkcji angielskiej firmy Sensonics Ltd, połączonych w system sejsmiczny ELOGOR-C. Sieć pozwala na rejestrację wstrząsów ze wszystkich oddziałów eksploatacyjnych ZG „Rudna”. Oprócz standardowej procedury lokalizacji oraz estymacji energii zjawisk, dzięki zapisom w sieci możliwa jest analiza mechanizmów ogniskowych wstrząsów.

Mechanizm ogniskowy wyznaczony z sieci dołowej obliczany jest za pomocą metody inwersji tensora momentu sejsmicznego przy użyciu programu FOCI (Kwiątek i in. 2016). Oprogramowanie to stosowane jest do wyznaczania mechanizmów ogniskowych wstrząsów w ZG „Rudna”, a zastosowana metodologia zweryfikowana została dla znacznej liczby wstrząsów górniczych zarówno w kopalniach miedzi, jak i węgla (Lizurek, Wiejacz 2011, Wojtecki, Dzik 2013). Program FOCI pozwala na wyznaczenie mechanizmu ogniska opisanego pełnym tensorem momentu sejsmicznego (MT) poprzez inwersję pierwszych amplitud w domenie czasu (Awad, Kwiątek 2005, Kwiątek i in. 2016), zarejestrowanych przez podziemną sieć sejsmologiczną kopalni „Rudna”. Ideą analizy jest jak najlepsze dopasowanie parametrów teoretycznych fali sejsmicznej dla danego MT do obserwowanych na sieci sejsmologicznej zapisów (Gibowicz, Kijko 1994). Do generacji danych syntetycznych przyjmuje się odpowiedni model sejsmogeologiczny, który w przypadku ZG „Rudna” opiera się na trzech rodzajach teoretycznych fal obserwowanych dla różnych odległości hipocentralnych, opracowanych dla wszystkich kopalń LGOMu, tj. złoża stratoidalnego zapadającego w kierunku NW, zalegającego na głębokości w przedziale od 600 do 1200 m i miąższości skał serii złożowych od 0,4 do



Rys. 1. Lokalizacja Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (Rydzewski 1996)

Fig. 1. Location of the Legnica-Głogów Copper District (Rydzewski 1996)

26 m. Teoretyczne przebiegi falowe symulują rzeczywisty promień fali sejsmicznej obserwowanej na granicach warstw skalnych. W celu ich generacji zakłada się parametry takie jak: głębokość ogniska, średnią gęstość ośrodka, zapadnie warstw skalnych oraz odpowiednią prędkość fali. Do wyznaczania mechanizmów ogniskowych w ZG „Rudna” wykorzystuje się następujące rodzaje teoretycznych fal sejsmicznych (Król 1998):

- fala A – symulowana fala załamana, powstała na kontakcie dolomitów i anhydrytów występujących w stropie złoża, o prędkości 5900 m/s rejestrowana w odległości hipocentralnej w przedziale od 1200 do 2600 m,
- fala B – symulowana fala załamana, powstała na kontakcie piaskowców i utworów krystalicznych występujących w spągu złoża o prędkości 5600 m/s, rejestrowana w odległości hipocentralnej powyżej 2600 m,
- fala bezpośrednia – symulowana fala pojawiająca się na zapisach w odległości mniejszej niż 1000 m od stanowiska pomiarowego, o prędkości 5000 m/s, propagująca wewnątrz złoża.

Taka propagacja fal wynika z budowy geologicznej złoża tj. płaskiego ułożenia warstw o niewielkim nachyleniu dochodzącym do 4°. Strop złoża budują dolomity o miąższości 60 - 90 m, których miąższość spada w rejonie północnym do 15 - 20 m wraz z występującymi nad nimi anhydrytami o miąższości dochodzącej do 160 m. W spągu zalegają piaskowce o miąższości do 300 m.

Do obliczenia mechanizmów ogniskowych użyto wszystkich wyżej wymienionych rodzajów fal zarejestrowanych przez 47 sejsmometrów. Danymi wejściowymi były amplitudy i polaryzacja pierwszych wejść fali P. Zgodnie z Fitch i in. (1980), przemieszczenia zarejestrowane na pionowych składowych czujników dla fali P wyraża następujące równanie:

$$U_z^P(x,t) = \frac{1}{4\pi\rho\alpha^3 r} \left[ \bar{\gamma} M \dot{s} \left( t - \frac{r}{\alpha} \right) \bar{\gamma} \right] l_z$$

gdzie:

- $\rho$  – średnia gęstość, kg/m<sup>3</sup>;
- $r$  – odległości źródło-odbiorniki, m;
- $\alpha$  – prędkość fali P, m/s;
- $\dot{s}$  – czasowa funkcji źródła (ang. *source time function* – STF) przy założeniu modelu Haskell'a (Haskell 1953);
- $M$  – moment sejsmiczny;
- $l_z$  – cosinus kąta padania fali;
- $\bar{\gamma}$  – kąt wyjścia fali.

Otrzymany w procesie inwersji, tensor MT posiada sześć niezależnych składowych, implikując w ten sposób minimalną ilość potrzebnych danych wejściowych, których powinno być przynajmniej sześć. Dla stabilizacji rozwiązania zaleca się, aby liczba ta była większa. W celu interpretacji wyników, MT

może być rozłożony (zdekomponowany) na kilka sposobów. Najpopularniejsza w przypadku sejsmologii górniczej jest dekompozycja na część izotropową oraz dewiatorową, którą dalej można rozłożyć na Liniowy Dipol Skompensowany (LDS) i Podwójną Parę Sił (PPS). Część izotropowa tensora opisuje zmianę objętości w źródle, LDS – jednoosiowe ściskanie lub rozciąganie, zaś PPS – czyste ścinanie. W przeciwieństwie do naturalnych trzęsień ziemi, które w sposób bardzo dobry opisywane są za pomocą PPS, zjawiska indukowane działalnością górniczą wykazują bardzo często odmienny charakter. W zjawiskach górniczych PPS odgrywa mniejszą lub nawet marginalną rolę.

Dnia 8.07.2015 roku o godzinie 08.53, w polu XII/1 zarejestrowany został wstrząs o energii określonej przez Kopalnię Stację Geofizyki Górniczej na  $2,6 \times 10^8$  J. Lokalizacja hipocentrum w układzie 2000 wyznaczona została na:  $X=5708215$ ,  $Y=5578019$ ,  $Z=-892$ . Wykorzystując zapisy 47 stanowisk sejsmometrycznych, przeprowadzono analizę mechanizmu ogniskowego tego zjawiska za pomocą programu FOCI. Proces minimalizacji residuów przeprowadzony został z wykorzystaniem normy L2, która dobrze sprawdza się w przypadku braku silnie odstających od reszty danych obserwacji. Wartości poszczególnych składowych pełnego tensora momentu sejsmicznego prezentuje tabela 1. Procentowy udział poszczególnych składowych tensora przedstawia się następująco: I = 20%, LDS = 65%, PPS 15%. Otrzymany moment sejsmiczny wynosi:  $3.15 \times 10^{13}$  Nm, co odpowiada magnitudzie momentu:  $M_w$  3.0.

Mechanizm zjawiska charakteryzuje się stosunkowo niewielką składową ścinającą (PPS), dużą zaś LDS. Jest to cecha charakterystyczna wielu wstrząsów górniczych obserwowanych w ZG „Rudna” (Lizurek, Wiejacz 2011). Tego typu dekompozycja składowych MT może być zinterpretowana jako zniszczenie filara.

### 3. Szerokopasmowa sieć sejsmiczna – mechanizm ogniska, lokalizacja centroidalna

Każdego roku kilkadziesiąt wysokoenergetycznych zjawisk sejsmicznych z rejonu LGOM rejestrowanych jest przez permanentne sieci sejsmologiczne składające się najczęściej z sejsmometrów szerokopasmowych o paśmie częstotliwości powyżej 100 s. Niemniej jednak z uwagi na znaczne odległości hipocentralne (rys. 2), najbliższa stacja KSP znajduje się w odległości około 70 km od kopalni LGOM, nieliczne ze zjawisk rejestrują się z jakością wystarczającą do prowadzenia analiz sejsmologicznych nakierowanych na badanie fizyki źródła.

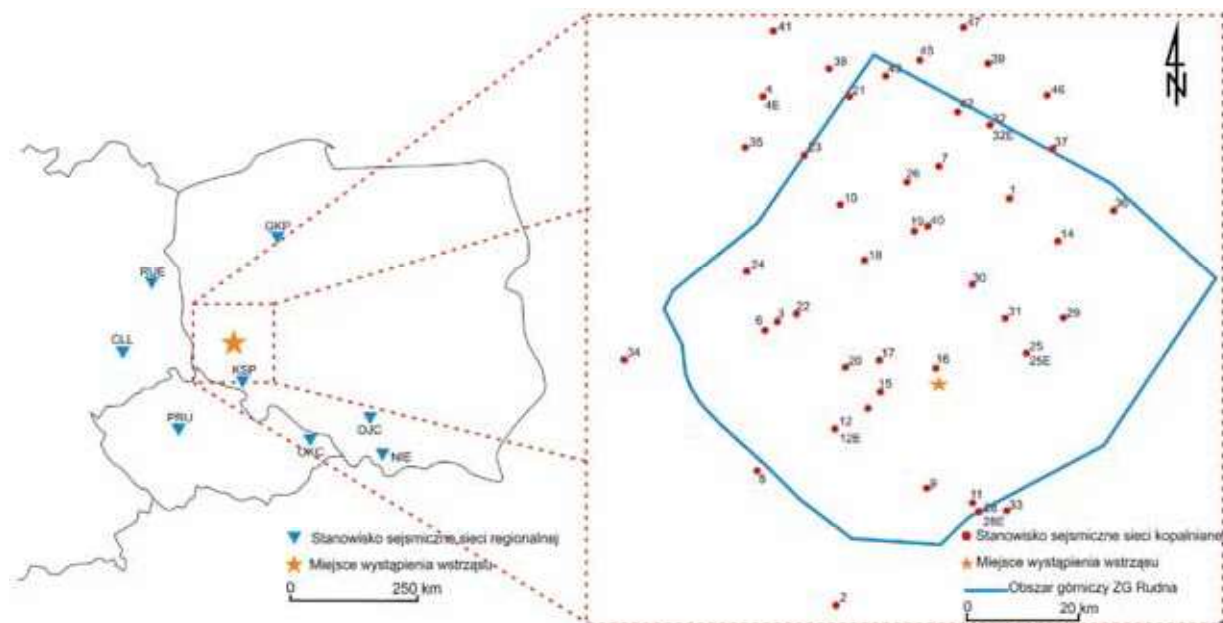
Zjawisko z dnia 08.07.2015 z godz. 8:53 było przykładem wstrząsu dobrze zarejestrowanego na sieciach szerokopasmowych. Według Europejsko-Śródziemnomorskiego Centrum Sejsmologicznego (EMSC: [www.emsc-csem.org](http://www.emsc-csem.org)) hipocen-

**Tabela 1. Wartości poszczególnych składowych rozwiązania pełnego tensora momentu sejsmicznego wraz z dekompozycją, momentem sejsmicznym i magnitudą momentu otrzymane dla sieci ZG „Rudna”**

**Table 1. The values of individual components of the full seismic moment tensor solution with decomposition, seismic moment and moment magnitude obtained for the Rudna mine network**

$m_{11}$	$m_{22}$	$m_{33}$	$m_{12}$	$m_{13}$	$m_{23}$
$-0.9 \times 10^{13}$	$-0.4 \times 10^{13}$	$3.5 \times 10^{13}$	$0.03 \times 10^{13}$	$-0.5 \times 10^{13}$	$0.1 \times 10^{13}$
Izotropowa		LDS		PPS	
20%		65%		15%	
Moment sejsmiczny $M_0$ [Nm]					
$3.15 \times 10^{13}$					
Magnituda momentu $M_w$					
3.0					





**Rys. 2. Kopalniana sieć sejsmologiczna ZG „Rudna” (z prawej) oraz sieć sejsmometrów szerokopasmowych wykorzystywanych w opisywanych badaniach**

**Fig. 2. Mining seismological network in Rudna mine, Poland (right) and a network of broadband seismometers used in this study**

trum zlokalizowane zostało (lokalizacja automatyczna – bez weryfikacji sejsmologa) w punkcie o współrzędnych 51.61N, 16.12E, głębokość: 1km o godzinie 08:53:18.4. Wyznaczona magnituda lokalna wyniosła  $ML=4.4$ . Biorąc pod uwagę doświadczenie oraz wcześniejsze opracowania (Lizurek, Wiejacz 2011, Lizurek i in. 2015), podana magnituda lokalna może być zawyżona. Weryfikacja magnitudy (w postaci magnitudy momentu sejsmicznego, najbardziej miarodajnej wielkości określającej siłę wstrząsu) może zostać uzyskana na podstawie dalszych analiz sejsmogramów.

Sejsmogramy z sieci szerokopasmowych analizowane w naszym opracowaniu należą do polskiej, niemieckiej oraz czeskiej sieci globalnej. Wszystkie stacje (tab. 2.) wyposażone są w sejsmometry Streckeisen STS-2, rejestrujące prędkość drgań cząstek gruntu w paśmie przenoszenia 120 s – 50 Hz. Dane w postaci plików z sejsmogramami oraz odpowiadające im opisy stacji (wraz z informacją o odpowiedzi sejsmometru i rejestratora) są dostępne na stronie internetowej projektu ORFEUS ([www.orfeus-eu.org](http://www.orfeus-eu.org)). W naszym przypadku były to dane dobowe, próbkowane z częstotliwością 20 próbek/s. Z danych dobowych wycinana była następnie odpowiednia część zapisu, z której wyeliminowano

odpowiedź sejsmometru i rejestratora, sygnał scałkowano w celu uzyskania rzeczywistego przemieszczenia oraz po użyciu filtra anti-aliasingowego poddano decymacji do 5 próbek/s.

W tej części badań przeprowadziliśmy analizę mechanizmu zjawiska (opisywanego za pomocą MT), posługując się techniką inwersji pełnego pola falowego. W technice tej sejsmogramy syntetyczne dopasowywane są do obserwacji nie tylko w zakresie pierwszych amplitud (jak w przypadku analizy z sieci dołowej), lecz znacznie większej części zapisu, obejmującej fale objętościowe oraz powierzchniowe w różnych zakresach częstotliwości. Badania wykonaliśmy z pomocą oprogramowania K1WI tool (<http://kinherd.org>), sprawdzonego we wcześniejszych studiach sejsmologii globalnej oraz lokalnej, w tym sejsmologii górniczej (Cesca i in. 2010, Rudziński 2013, San i in. 2013, Rudziński, Lizurek 2015, Rudziński i in. 2016). Wykorzystując posiadane dane, byliśmy w stanie prowadzić analizy zarówno w dziedzinie czasu (sejsmogram), jak i częstotliwości (spektrogram). Szczególną cechą inwersji w domenie częstotliwości jest znacznie mniejsza czułość metody na błędy spowodowane złym dopasowaniem modelu prędkościowego.

**Tabela 2. Podstawowe informacje o sejsmometrach sieci szerokopasmowych. Lokalizacja, azymut, odległość epicentralna**

**Table 2. Basic information about the broadband seismometers. The location, azimuth, epicentral distance**

Kod stacji	Długość geogr.	Szer. Geogr.	Azymut	Odległość epicentralna
KSP	50.8433	16.2933	171	74 km
RUE	52.4759	13.7800	-55	194 km
PRU	49.9883	14.5417	-146	202 km
GKP	53.2697	17.2367	21	210 km
CLL	51.3077	13.0026	-94	218 km
OKC	49.8375	18.1472	141	234 km
OJC	50.2195	19.7984	117	295 km
NIE	49.4189	20.3131	126	377 km

W celu uzyskania regionalnego rozwiązania MT podążaliśmy drogą opisaną w literaturze, a polegającą na analizie w dwóch podstawowych krokach (Cesca i in. 2010). W kroku pierwszym, prowadzonym w domenie częstotliwości, otrzymujemy mechanizm zjawiska bez opisanych stref kompresji i tensji, które w procesie analizy polaryzacji otrzymujemy w kroku drugim, przeprowadzonym w domenie czasu. Inwersja w domenie czasu w drugim kroku (z założonym mechanizmem z kroku pierwszego) pozwala na uzyskanie nie tylko pełnej informacji o źródle punktowym, lecz również lokalizację centroidalną (Dziewoński i in. 1981). Lokalizacja ta, w odróżnieniu od lokalizacji ogniska, opisuje nie czas oraz miejsce rozpoczęcia pęknięcia, lecz miejsce, które odpowiada środkowemu punktowi strefy rozrywu o największym przemieszczeniu mas skalnych w źródle. Lokalizacja centroidalna podaje cenne informacje seismologiczne, przy czym podejmowane były próby jej interpretacji jako wskaźnika dla źródła rozciągłego, pozwalając na identyfikację płaszczyny nodalnej uskoku (Zahradnik i in. 2008) w przypadku dominującej składowej PPS. Potrzebne w procesie inwersji seismogramy syntetyczne wyznaczone zostały na podstawie modelu prędkościowego opracowanego na podstawie pracy (Grad i in. 2003). Zasadność wybranego modelu była sprawdzona we wcześniejszych analizach regionalnych (Rudziński i in., 2016, Rudziński i in., 2016a). Stabilne rozwiązanie mechanizmu udało się uzyskać dla dopasowania spektrogramów w zakresie częstotliwości 0.13 – 0.16 Hz. Stosunkowo niskie częstotliwości generowane przez źródło mogą być związane z płytkim położeniem ogniska lub długim czasem pęknięcia górotworu.

W tabeli 3. przedstawione zostało rozwiązanie w postaci pełnego MT wraz z odpowiadającym mu momentem sejsmicznym  $M_0$  oraz magnitudą momentu  $M_w$ . W celu interpretacji mechanizmu podaliśmy tę samą drogą jak w przypadku dekompozycji MT z sieci dołowej. Regionalny MT został zdekomponowany na część izotropową, LDS i PPS (tab. 3).

Najbardziej charakterystyczną cechą otrzymanego rozwiązania jest bardzo wysoka składowa izotropowa (implozyjna), wynosząca ponad 62% pełnego rozwiązania tensora. Mechanizm ogniska z tego typu rozwiązaniem mógł być odpowiedzialny za wyraźne efekty w postaci zaciskania wyrobiska z wypiętrzeniem spagu (Rudziński, Lizurek 2015, Rudziński i in. 2016, Rudziński i in. 2016a). Jak wykazała wizja lokalna, tego typu efekty zostały zauważone w pewnej odległości od epicentrum w kierunku ENE. Sugeruje to przesunięcie się głównej części pęknięcia górotworu w tym kierunku. Metodą pozwalającą na weryfikację postawionej sugestii jest interpretacja lokalizacji centroidalnej uzyskanej w drugim kroku inwersji w domenie czasu. Strategia poszukiwania lokalizacji centroidalnej oparta jest na dopasowaniu niskoczęstotliwościowej części zapisu. W naszym przypadku w procesie przeszukiwania siatki, lokalizacja centroidalna wyznaczana była w siatce o rozmiarze 600 m od epicentrum

z krokiem co 50 m. Przyjęty w badaniu rozmiar siatki jest zbliżony do spodziewanego dla  $M \sim 4.0$  dwukrotnego rozmiaru źródła. Na rys. 3. pokazany został rozkład prawdopodobieństwa lokalizacji centroidalnej. Epicentrum zjawiska znajduje się w punkcie 0,0 oznaczonym czarnym okręgiem, szarymi kółkami oznaczone zostało prawdopodobieństwo (im większe kółko, tym większe prawdopodobieństwo) lokalizacji centroidalnej. Wynik wyraźnie wskazuje na przesunięcie środka strefy rozrywu górotworu w kierunku NE oraz S i SW, w rejon występowania zrobów (rys. 3).

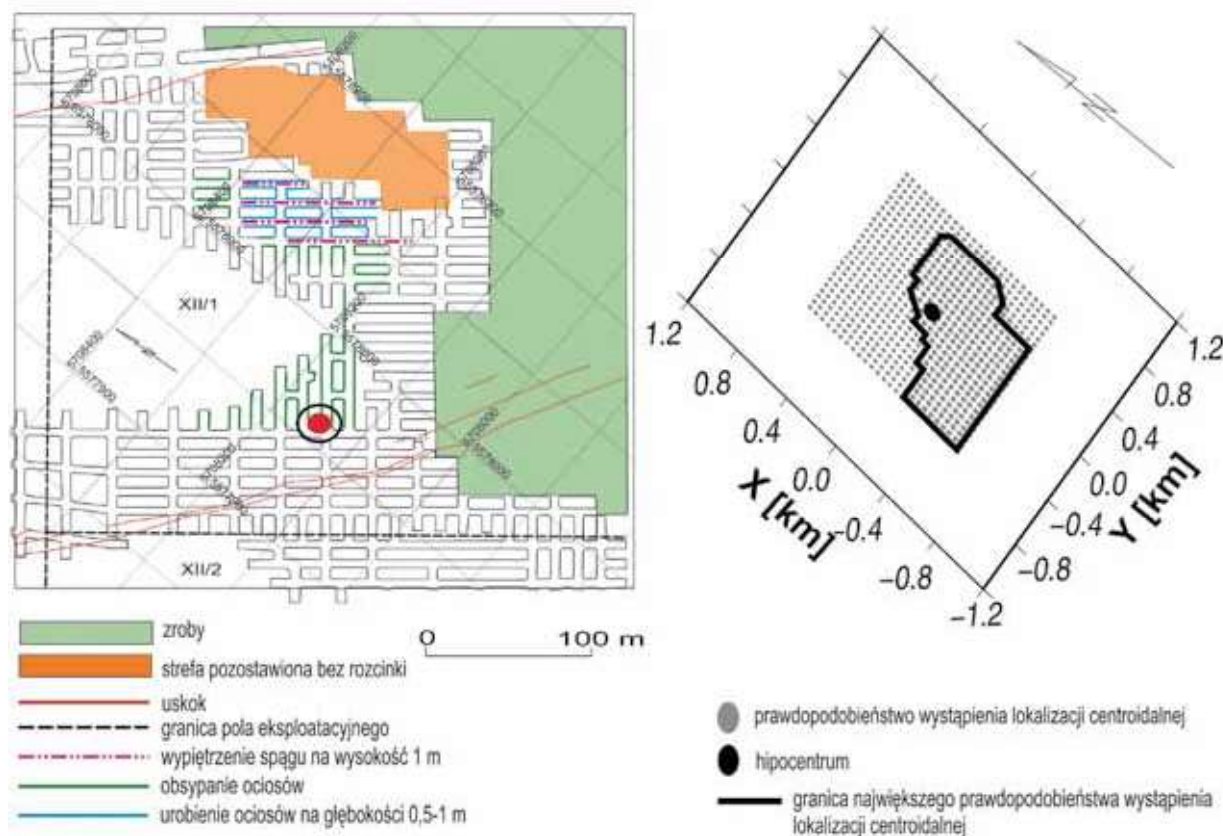
#### 4. Dyskusja wyników i wnioski

Znajomość mechanizmów ognisk sejsmicznych jest niezbędna do zrozumienia procesów fizycznych zachodzących w sejsmiczności indukowanej działalnością górnictwem. Analizując silne zjawisko z ZG „Rudna”, mieliśmy do dyspozycji dobrej jakości dane zapisane na dwóch różnych sieciach seismometrycznych. W przypadku sieci dołowej, używając inwersji pierwszych amplitud wejść fali P na różnych stanowiskach, byliśmy w stanie zaproponować możliwe wyjaśnienie jego powstania. Wysoka składowa LDS: 65% (tab. 1.) pełnego tensora może być zinterpretowana jako pęknięcie istniejącego filara. Silne zjawiska o takim pochodzeniu w ZG „Rudna” nie stanowią wyjątku i są uwarunkowane pracami górnictwem (system komorowo-filarowy). Z drugiej strony wykonana analiza danych z regionalnych sieci seismologicznych przynosi bardzo ciekawe informacje. W szczególności źródło sejsmiczne było zdolne do wygenerowania fal sejsmicznych o stosunkowo niskich częstotliwościach (drżania o dużej energii widoczne po użyciu filtra dolnoprzepustowego poniżej 0,16 Hz), co może sugerować odmienne pochodzenie zjawiska. W rzeczywistości mechanizm wstrząsu otrzymany z wykorzystaniem danych regionalnych opisywany jest jako zjawisko typu zamykania pustek (wyrobisk), gdzie MT opisywany jest bardzo dużą składową izotropową ujemną (implozja), wynoszącą: -62% (tab. 3.). Najprostszym wyjaśnieniem tego typu mechanizmu jest obserwacja znacznych skutków w wyrobiskach, co zostało potwierdzone wizją lokalną, niemniej z przesunięciem względem wyznaczonego epicentrum. Zaistniałe przesunięcie możliwe jest do wyjaśnienia poprzez analizę prawdopodobieństwa położenia lokalizacji centroidalnej. Interpretacja wyników lokalizacji centroidalnej (rys. 3.) sugeruje kierunek propagacji środka rozrywu mas skalnych w kierunkach NE oraz S i SW od 100 do 400 metrów. Odpowiada to w przypadku kierunku NE obserwowanym skutkom, zaś kierunku S i SW – terenom zrobów pola XII/1 i calizny pola XII/2. O ile zjawisko opisane rozwiązaniem regionalnym MT jest mało prawdopodobne fizycznie dla calizny w polu XII/2, o tyle zaciśnięcia zrobów XII/1 nie można do końca wykluczyć.

**Tabela 3. Wartości poszczególnych składowych rozwiązania pełnego tensora momentu sejsmicznego wraz z dekompozycją oraz momentem sejsmicznym i magnitudą momentu otrzymane dla sieci seismometrów szerokopasmowych**

**Table 3. The values of individual components of the full seismic moment tensor solution with decomposition, seismic moment and moment magnitude obtained for a network of broadband seismometers**

$m_{11}$	$m_{22}$	$m_{33}$	$m_{12}$	$m_{13}$	$m_{23}$
$-4.1 \times 10^{14}$	$-3.8 \times 10^{14}$	$-8.2 \times 10^{14}$	$0.5 \times 10^{14}$	$-1.1 \times 10^{14}$	$0.6 \times 10^{14}$
Izotropowa		LDS		PPS	
- 62%		30%		8%	
Moment sejsmiczny $M_0$ [Nm]					
8.6x10 <sup>14</sup>					
Magnituda momentu $M_w$					
3.9					



**Rys. 3. Wycinek mapy górniczej (z lewej) pola XII/1 z zaznaczonym miejscem hipocentrum wstrząsu oraz rozwiązanie pełnego tensora momentu sejsmicznego z sieci dołowej. Otrzymane wyniki lokalizacji centroidalnej (z prawej)**  
**Fig. 3. The mining map section (on the left) of field XII/1 with the place of tremor hypocenter occurrence and results of the full seismic moment tensor obtained with mine network. On the right, the centroid location analysis**

Komentarza wymaga również znacząca różnica w mechanizmach otrzymanych z sieci dołowej i regionalnej. Przeprowadzone analizy wykluczają możliwość uzyskania innych, stabilnych i jednoznacznych wyników inwersji z obu sieci. Otrzymane rezultaty mogą być więc wyjaśnione poprzez sklasyfikowanie ogniska wstrząsu jako złożonego. Wyszukujemy podejrzenie, że zjawisko rozpoczęło się od zgniatania filara, a następnie propagowało w kierunku ENE, gdzie nastąpiło zaciskanie wyrobisk. Potwierdzeniem wysuniętej tezy, oprócz interpretacji procesu rozrywu opisanego rozwiązaniami MT, może być dodatkowo przeprowadzona analiza wstrząsu, który wystąpił w sąsiednim polu XII/2, w odległości około 360 m od hipocentrum wcześniejszego zjawiska. Wstrząs ten wystąpił 3 min 50 s po pierwszym i miał energię określoną na  $1.0 \times 10^7$  J, tj. o rząd wielkości mniejszą od zjawiska wcześniejszego. Również rejestracje z sieci regionalnej wykazują znacznie mniejszą energię, a zjawisko zarejestrowane jest jedynie „w ogniu” pierwszego, na najbliższej LGOM stacji KSP. Uzyskany mechanizm drugiego zjawiska wykazywał cechy charakterystyczne dla pęknięcia filara (MT [Nm]:  $m_{11} = -1.67 \times 10^{13}$ ,  $m_{22} = -1.31 \times 10^{13}$ ,  $m_{33} = 7.66 \times 10^{13}$ ,  $m_{12} = 2.61 \times 10^{12}$ ,  $m_{13} = 4.9 \times 10^{11}$ ,  $m_{23} = -2.85 \times 10^{12}$ ) był więc o pochodzeniu zbliżonym do pierwszej fazy rozrywu wstrząsu pierwszego. Inną jego cechą jest większy moment sejsmiczny  $M_0 = 6.5 \times 10^{13}$  Nm, podczas gdy dla pierwszej fazy wstrząsu wcześniejszego było to  $3.15 \times 10^{13}$  Nm. Przedstawione w pracy analizy pozwalają na wysunięcie następujących wniosków co do przebiegu procesu pęknięcia górotworu. Zjawisko z dnia 08.07.2015 roku z godziny 08:53 rozpoczęło się jako efekt zniszczenia filara przy strefie osłabiania blisko uskoku w polu XII/1 (rys. 3.). Zjawisko to można przyjąć za pierwszy etap

pęknięcia górotworu z momentem sejsmicznym  $M_0 = 3.15 \times 10^{13}$  Nm. W następstwie spowodowało to zaciskanie wyrobisk na ENE od epicentrum (ewentualnie wraz z zaciskaniem zrobów na S od epicentrum), z generacją większego momentu o wartości  $M_0 = 8.6 \times 10^{14}$  Nm. Taki przebieg procesu pęknięcia mógł spowodować dominację energii na sejsmogramach sieci dołowej od sub-zjawiska z większym momentem, w konsekwencji prowadząc do wygenerowania energii wyznaczonej na  $2.6 \times 10^8$  J, czyli większej, niż energia wstrząsu następczego o podobnym mechanizmie rozrywu co pierwszy z sub-wstrząsów. Warto również zauważyć potencjalną przydatność analizy lokalizacji centroidalnej w celu wyznaczania kierunku propagacji pęknięcia górotworu dla zjawisk silnych o możliwym skomplikowanym mechanizmie. Szczególnie w sytuacji gdy skutki w wyrobiskach nie są obserwowane, a rozwiązanie MT wskazuje na możliwość ich wystąpienia.

*Praca powstała przy wsparciu finansowym badań statutowych Instytutu Geofizyki PAN Nr 3841/E-41/S/2016. Część obrazków wykonana została za pomocą programu Generic Mapping Tools (Wessel i Smith 1998).*

## Literatura

- AWAD, H., KWIATEK G. 2005 - Focal mechanism of earthquakes from the June 1987 swarm in Aswan, Egypt, calculated by the moment tensor inversion, *Acta Geophys. Pol.* 53, 3, s. 275-291.
- CESCA S., HEIMANN S., STAMMLER K., DAHM T. 2010 - Automated procedure for point and kinematic source inversion at regional distances, *J. Geophys. Res.* 115, B6, B06304, DOI: 10.1029/2009JB006450.

- DZIEWOŃSKA, CHOU T. A., WOODHOUSE J. H. 1981 - Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *J. Geophys. Res.*, 862825-2852, DOI: 10.1029/JB086iB04p02825.
- FITCH, T.J., MCCOWAN D.W., SHIELDS M.W. 1980 - Estimation of seismic moment tensor from teleseismic body wave data with applications to intraplate and mantle earthquakes. *J. Geophys. Res.* 85, B7, 3817-3828, DOI: 10.1029/JB085iB07p03817.
- GIBOWICZ S.J., KIJKO A. 1994 - Introduction to mining seismology. Academic Press, San Diego.
- GRAD, M., JENSEN S.L., KELLER G.R., GUTERCH A., THYBO H., JANIK T., TIIRA T., YLINIEMI J., LUOSTO U., MOTUZA G. 2003 - Crustal structure of the trans-European suture zone region along POLONAISE'97 seismic profile P4. *J. Geophys. Res.* 108, doi: 10.1029/2003JB002426.
- HASEGAWA H. S., WETMILLER R. J., GENDZWILL D. J. 1989 - Induced seismicity in mines in Canada—An overview. *Pure Appl. Geophys.* 129, 423–453.
- HASKELL N.A. 1953 - The dispersion of surface waves on multilayered media. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 43, 1, 17-34.
- KOZIARZ E., SZŁAPKA M. 2010 - Kierunki dalszego rozwoju informatycznego systemu do bezpośredniej lokalizacji zjawisk dynamicznych w O/ZG „Rudna” KGHM „Polska Miedź” SA. „Wiadomości Górnicze”, nr 3, s. 159-174.
- KRÓL M. 1998 - Zastosowanie tensora momentu sejsmicznego oraz analizy widmowej fal sejsmicznych do badania ognisk wstrząsów z rejonu kopalni miedzi „Polkowice-Sieroszowice”. Praca doktorska. Biblioteka Instytutu Geofizyki PAN, Warszawa.
- KWIATEK G., MARTINEZ-GARZON P., BOHNHOFF M. 2016 - HybridMT: A MATLAB/shell environment package for seismic moment tensor inversion and refinement. *Seismol. Res. Lett.* 87 (4), DOI: 10.1785/0220150251.
- LIZUREK, G., WIEJACZ P. 2011 - Moment tensor solution and physical parameters of selected recent seismic events at Rudna Copper Mine, in *Geophysics in Mining and Environmental Protection*, A. F. Idziak and R. Dubiel (Editors), Geoplanet: Earth and Planetary Sciences 2, Springer, Heidelberg, Germany, doi: 10.1007/978-3-642-19098\_12.
- LIZUREK G., PLASIEWICZ B., RUDZIŃSKI Ł. 2015 - Mining Induced Seismic Event on an Inactive Fault. *Acta Geophysica* 63, 1: 176-200, doi: 10.2478/s11600-014-0249-y.
- RUDZIŃSKI Ł. 2013 - Rozwiązanie mechanizmu zjawiska sejsmicznego poprzez inwersję sejsmogramów, „Przeгляд Górniczy” nr 5.
- RUDZIŃSKI Ł., LIZUREK G. 2015 - Mechanizm zjawiska sejsmicznego oraz tąpnięcia w OZG Rudna w Polkowicach z 19.03.2013 r. z wykorzystaniem lokalnych i regionalnych sieci sejsmologicznych 2015, „Czasopismo Naukowo-Techniczne Górnictwa Rud” nr 3 (76), Wrocław, s. 61-72.
- RUDZIŃSKI Ł., SIMONE C., LIZUREK G. 2016 - Complex Rupture Process of the 19 March 2013, Rudna Mine (Poland) Induced Seismic Event and Collapse in the Light of Local and Regional Moment Tensor Inversion *SEISMOLOGICAL RESEARCH LETTERS*, Vol 87, pp: 274-284 doi:10.1785/0220150150.
- RUDZIŃSKI Ł., MIREK K., MIREK J. 2016a- Source mechanism analysis of strong induced seismic event and its influence on ground deformation observed by InSAR technique. EGU General Assembly 2016, Wiedeń, Austria (poster).
- RYDZEWSKI A. 1996 - Historia odkrycia nowego zagłębia miedziowego. W: Monografia KGHM Polska Miedź S.A. Lubin, s. 29-36.
- SEN A.T., CESCA S., BISCHOFF M., MEIER T., DAHM T. 2013 - Automated full moment tensor inversion of coal mining-induced seismicity. *Geophys. J. Int.* 195, 1267–1281, doi: 10.1093/gji/ggt300.
- STEC K. 2009 - Methods for Determining the Mechanism of Tremors Foci (Metody wyznaczania mechanizmu ognisk wstrząsów). *Prace Naukowe GIG „Górnictwo i Środowisko”*, Katowice, 4,1: 223–236.
- WESSEL P., SMITH W.H.F. 1998 - New, improved version of Generic Mapping Tools released. *Eos Trans. AGU* 79, 579.
- WIEJACZ, P. 1992 - Calculation of seismic moment tensor for mine tremors from the Legnica-Głogów Copper Basin, *Acta Geophys. Pol.* 40, 2, 1992, s. 103-122.
- WOJTECKI Ł., DZIK G. 2013 - Charakterystyka mechanizmu ognisk wysokoenergetycznych wstrząsów górotworu występujących podczas eksploatacji ścianowej pokładu 507, „Przeгляд Górniczy” nr 12.
- ZAHRADNÍK, J., GALLOVIČ, F., SOKOS, E., SERPETSIDAKI, A., TSELENTIS, G-A. 2008 - Quick fault-plane identification by a geometrical method: application to the Mw6.2 Leonidio earthquake, January 6, 2008, Greece. *Seismol. Res. Letters* 79, 653-662.

Artykuł wpłynął do redakcji – listopad 2016

Artykuł akceptowano do druku 5.03.2017