



Krzysztof FUŁAWKA¹, Witold PYTEL², Piotr MERTUSZKA³, Eugeniusz KOZIARZ⁴

Pilotażowe pomiary składowych rotacyjnych drgań sejsmicznych w rejonie LGOM

Streszczenie: Metody sejsmiczne są powszechnie stosowane w górnictwie, geofizyce oraz inżynierii lądowej. Aktualnie pomiary sejsmiczne prowadzi się głównie w zakresie rejestracji prędkości i przyspieszeń trzech składowych translacyjnych drgań. Wiedząc jednak, że pełny opis ruchu fali sejsmicznej, oprócz wspomnianych składowych translacyjnych, zawiera również trzy składowe rotacyjne, konieczne było podjęcie działań mających na celu pomiar i określenie charakteru tych ostatnich. Jeszcze do niedawna analiza rotacyjnych fal sejsmicznych prowadzona była wyłącznie w sferze teoretycznej, gdyż brakowało narzędzi umożliwiających rejestrację prędkości obrotowej cząstek gruntu, na poziomie często nieprzekraczającym ułamków $\mu\text{rad/s}$. Obecnie jednak sejsmologia rotacyjna jest zagadnieniem cieszącym się ogromnym zainteresowaniem, co wynika z pojawienia się na rynku czujników umożliwiających bezpośredni pomiar składowych obrotowych drgań sejsmicznych. Brak jest jednak kompleksowych opracowań w zakresie analizy tychże składowych w przypadku drgań indukowanych działalnością górniczą. W niniejszym opracowaniu przedstawiono wyniki pilotażowych pomiarów składowych rotacyjnych drgań. Analizie poddano zapisy wstrząsów górniczych o energii w zakresie od 3×10^3 J do $1,5 \times 10^7$ J. Zarejestrowane wartości obrotu zostały skorelowane z zapisami drgań translacyjnych w celu określenia różnic w ich podstawowych parametrach takich jak czas trwania, częstotliwość i rozkład amplitudowy.

Słowa kluczowe: zagrożenie sejsmiczne, wstrząsy górnicze, sejsmologia rotacyjna

¹ KGHM CUPRUM sp. z o.o. – Centrum Badawczo-Rozwojowe, Wrocław; ORCID iD: 0000-0002-0534-0712; e-mail: kfulawka@cuprum.wroc.pl

² Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej, Wrocław; ORCID iD: 0000-0002-3687-2957; e-mail: wpytel@cuprum.wroc.pl

³ KGHM CUPRUM sp. z o.o. – Centrum Badawczo-Rozwojowe, Wrocław; ORCID iD: 0000-0002-2539-104X; e-mail: pmertuszka@cuprum.wroc.pl

⁴ KGHM Polska Miedź SA, Oddział Zakłady Górnicze „Rudna”, Polkowice; e-mail: eugeniusz.koziarz@kgm.com



Preliminary measurements of rotational components of seismic vibration in the Legnica-Głogów Copper Basin region

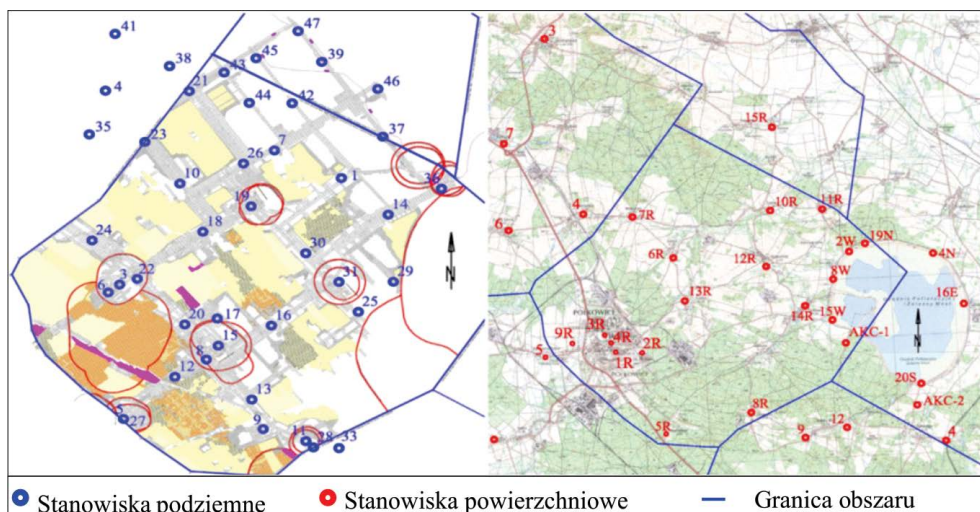
Abstract: A proper description of ground motions generated by seismic and paraseismic events requires gathering data of six components of seismic waves. Three of them, the so called translational waves, are well researched and identified. Unfortunately, until recently, the remaining three components named as rotational waves were generally estimated with the use of indirect methods based on theoretical calculations. This was related mostly with the lack of proper instruments for the recording of rotational seismic waves. Thus, rotational waves were not fully recognized thus far. Recently, several types of advanced instruments for direct measurements of rotation were invented. Based on the measurements of strong ground motions it was indicated that the amplitude of the rotational components in close distances from the seismic source can be significantly larger than expected. Apart from this, there is still a lack of analyses considering the characteristic of rotational seismic waves generated by induced seismic events. In this paper, the results of preliminary measurements of rotational motions generated by induced seismic waves were presented. Ground movements related with mining tremors were analyzed in terms of amplitude, frequency and duration.

Keywords: seismic hazard, mining tremors, rotational seismology

Wprowadzenie

Eksploracji złoża rud miedzi w rejonie Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (LGOM) towarzyszy wysoki poziom aktywności sejsmicznej. Skutki oddziaływania dynamicznego w postaci drgań parasejsmicznych widoczne są zarówno w wyrobiskach podziemnych, jak i na powierzchni terenu. Bazując na doświadczeniach z kopalń podziemnych na całym świecie można sformułować tezę, że przy dzisiejszym stanie wiedzy i techniki, aktywności sejsmicznej towarzyszącej eksploatacji podziemnej nie można całkowicie wyeliminować. Można jednak podejmować próby jej minimalizacji. W przypadku kopalń rud miedzi należących do KGHM Polska Miedź SA, znaczna część czynnych pól eksploatacyjnych zlokalizowana jest bezpośrednio pod terenami zabudowanymi, w związku z czym konieczne jest prowadzenie bieżących pomiarów parametrów drgań sejsmicznych, celem oceny ich szkodliwego wpływu na infrastrukturę powierzchniową (Jaśkiewicz-Proć 2012). Znajomość amplitudy, częstotliwości i czasu trwania drgań jest niezbędna do oceny intensywności sejsmicznej, np. w oparciu o Skalę GSI (Jaśkiewicz-Proć 2014; Dulińska i Zięba 2010). Obecnie tereny zagrożone oddziaływaniami dynamicznymi monitorowane są przez powierzchniową i podziemną sieć stanowisk sejsmicznych pracujących w trybie autonomicznym. W efekcie większość wysokoenergetycznych wstrząsów sejsmicznych jest równocześnie rejestrowana obydwoma sieciami pomiarowymi (Grzebyk i in. 2017). Obserwacje powierzchniowe ukierunkowane są głównie na monitorowanie budynków mieszkalnych oraz, kluczowej z punktu widzenia ciągłości eksploatacji, zapory ziemnej Obiektu Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych (OUOW) Żelazny Most. Lokalizację stanowisk sejsmicznych w rejonie kopalni Rudna przedstawiono na rysunku 1.

Do oceny oddziaływania drgań sejsmicznych i parasejsmicznych na obiekty w polskich kopalniach rud miedzi, podobnie jak w górnictwie światowym, stosuje się metody bazujące na analizie danych otrzymanych z pomiarów prędkości i przyspieszeń składowych translacyjnych drgań (Maciąg 2005; Torunbalci i Ozpalanlar 2008). W ostatecznym rozliczeniu



Rys. 1. Lokalizacja stanowisk pomiarowych podziemnej (lewa) i powierzchniowej (prawa) sieci sejsmicznej na terenie kopalni Rudna

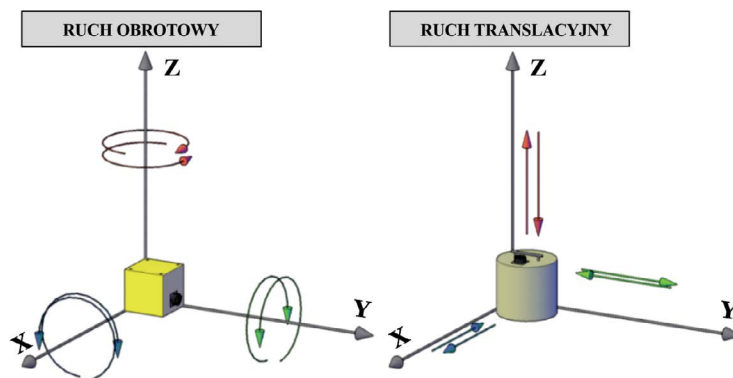
Fig. 1. Location of seismic posts of underground (left) and surface (right) seismic network of the Rudna mine

składowe rotacyjne drgań sejsmicznych są całkowicie pomijane. Do niedawna taka sytuacja wynikała z braku odpowiedniej technologii umożliwiającej pomiar drgań rotacyjnych oraz z przekonania, iż wartości obrotu generowanego falą sejsmiczną są tak niewielkie, że mogą być pomijane. Rosnące w ostatnich latach zainteresowanie nowym obszarem geofizyki przełożyło się jednak na szybki rozwój nowych metod pomiarowych umożliwiających pomiar zarówno składowych translacyjnych, jak i rotacyjnych (Schmelzbach i in. 2018). W niniejszym opracowaniu przedstawiono wyniki kilkumiesięcznych pilotażowych pomiarów sejsmicznych drgań obrotowych i translacyjnych generowanych działalnością górniczą w rejonie kopalń rud miedzi LGOM.

1. Rotacyjne składowe drgań sejsmicznych

Główny ruch cząstek w ciele stałym może być podzielony na dwie grupy: translacyjną (wzdłuż osi X, Y oraz Z) oraz rotacyjną wokół osi (X, Y i Z) (rys. 2) (Teisseyre 2006, 2010).

Jak zaznaczono w pracach (Teisseyre 2006, 2010) oraz (Lee 2011; Huang 2000), analizy teoretyczne wykazują, że sypkie materiały skalne, podobnie jak spękane, zwietrzałe czy zawodnione skały, mogą wpływać na nieregularną dystrybucję fal sejsmicznych tworząc jednocześnie zjawisko rotacji. Występowanie dodatkowych trzech składowych ruchu falowego nie może być zatem pomijane, m.in. ze względu na oddziaływanie na obiekty zlokalizowane w bliskim polu falowym. Implementacja obrotu cząstek do analiz numerycznych może w istotnym stopniu wpłynąć na poprawę dokładności wykonywanych obliczeń,



Rys. 2. Uproszczona zasada trójskładowych pomiarów rotacyjnych (lewa) i translacyjnych (prawa)

Fig. 2. Simplified method of rotational (left) and translational (right) measurements

a w efekcie umożliwi bardziej wiarygodną ocenę wpływu aktywności sejsmicznej na wyrobiska, skarpy, nasypy czy budowle powierzchniowe. Aktualnie na rynku dostępnych jest kilka typów sejsmometrów przeznaczonych stricte do pomiarów rotacyjnych drgań sejsmicznych. Narastające przekonanie o wartości informacji, którą mogą nieść za sobą dodatkowe składowe ruchu fali sejsmicznej powoduje, że pomiary rotacyjne są realizowane nie tylko w przypadku wysokoenergetycznych trzęsień ziemi (Chin-Jen i in. 2008), ale również m.in. w inżynierii lądowej (Trifunac 2009; Grzebyk i in. 2015), geofizyce górniczej (Zembaty i in. 2017; Kaláb i in. 2012), a nawet przy pomiarach kosmicznych fal grawitacyjnych (Ju 2000). Zakłada się, że ruchy skrętne gruntu mogą negatywnie oddziaływać głównie na wielkogabarytowe obiekty infrastruktury powierzchniowej. Niemniej geofizycy badający zjawisko fali rotacyjnej wielokrotnie wykazywali jej wpływ na budowle o stosunkowo małych gabarytach (Hart 1975; Suryanto 2006; Zerva 1997; Gordon 1968).

2. Pomiar drgań sejsmicznych

Do badań zastosowano sejsmometry firmy Eentec, w tym trójskładowy sejsmometr do pomiarów rotacyjnych fal sejsmicznych i trójskładowy sejsmometr do pomiarów translacyjnych. Oznacza to, że rejestrowano wszystkie sześć komponentów fali sejsmicznej.

Sejsmometr rotacyjny R-1 wykorzystuje technologię elektrochemiczną i charakteryzuje się wysoką czułością pomiaru. Dzięki zastosowaniu zaawansowanych czujników możliwy jest pomiar prędkości obrotowej fali przy jednoczesnym zapewnieniu względnej niewrażliwości na ruch translacyjny. Urządzenie może pracować w temperaturach od $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$, dzięki czemu nie ma technicznych przeszkód, aby używać go zarówno w warunkach powierzchniowych, jak i podziemnych. Z kolei do pomiarów składowych translacyjnych wykorzystano szerokopasmowy, trójskładowy sejsmometr EP-300, który ze względu na niski pobór energii, przeznaczony jest zarówno do zastosowań stacjonarnych, jak i tere-

nowych. Wydajne czujniki elektrodynamiczne zapewniają rozszerzony zakres dynamiki, wysoką stabilność i liniowość w całym zakresie pasma rejestracji. Pomiar prędkości drgań realizowany jest przez trzy identyczne czujniki elektrochemiczne zamontowane prostopadle wzdłuż osi X, Y (składowe horyzontalne) i Z (składowa wertykalna). W trakcie badań aparatura została umieszczona na powierzchni terenu, w betonowej studziencie o głębokości około 2 m znajdującej się u podstawy zapory OUOW Żelazny Most (rys. 3).



Rys. 3. Sposób instalacji aparatury pomiarowej

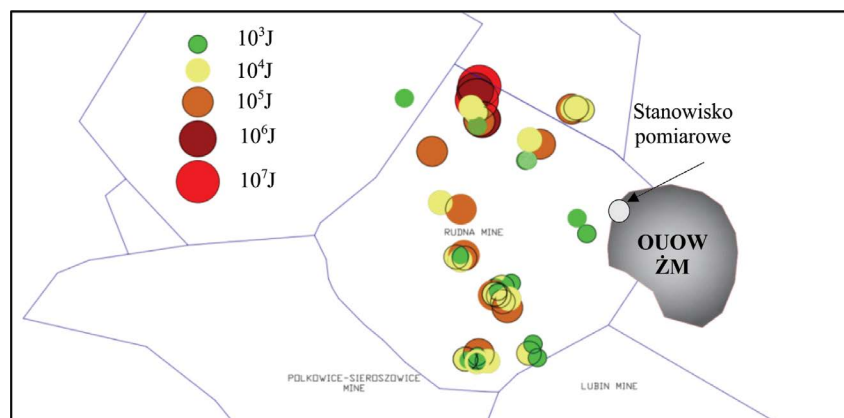
Fig. 3. Method of seismic recorders installation

Stanowisko pomiarowe było zlokalizowane w północno-zachodniej części obiektu. Rejestracją objęte zostały wszystkie wstrząsy o energii $\geq 10^3$ J.

3. Analiza podstawowych parametrów drgań sejsmicznych

W trakcie dwumiesięcznych pomiarów zarejestrowano w sumie 49 wstrząsów indukowanych o energii przekraczającej 10^3 J, których odległość hipocentralna od stanowisk pomiarowych mieściła się w zakresie od 1200 do nawet 7800 metrów. Lokalizacja wszystkich zarejestrowanych wstrząsów, wraz z uwzględnieniem ich klas energetycznych, została przedstawiona na rysunku 4.

Spośród wszystkich zarejestrowanych zdarzeń w tym okresie, wyłącznie 4 wstrząsy były zjawiskami wysokoenergetycznymi. Ich energie i odległości hipocentralne względem stanowisk pomiarowych zostały przedstawione w tabeli 1.



Rys. 4. Lokalizacja epicentralna ognisk zarejestrowanych wstrząsów względem stanowiska pomiarowego

Fig. 4. Location of recorded seismic events in relation to measuring posts

TABELA 1. Wypis zarejestrowanych zjawisk wysokoenergetycznych

TABLE 1. List of recorded high-energy tremors

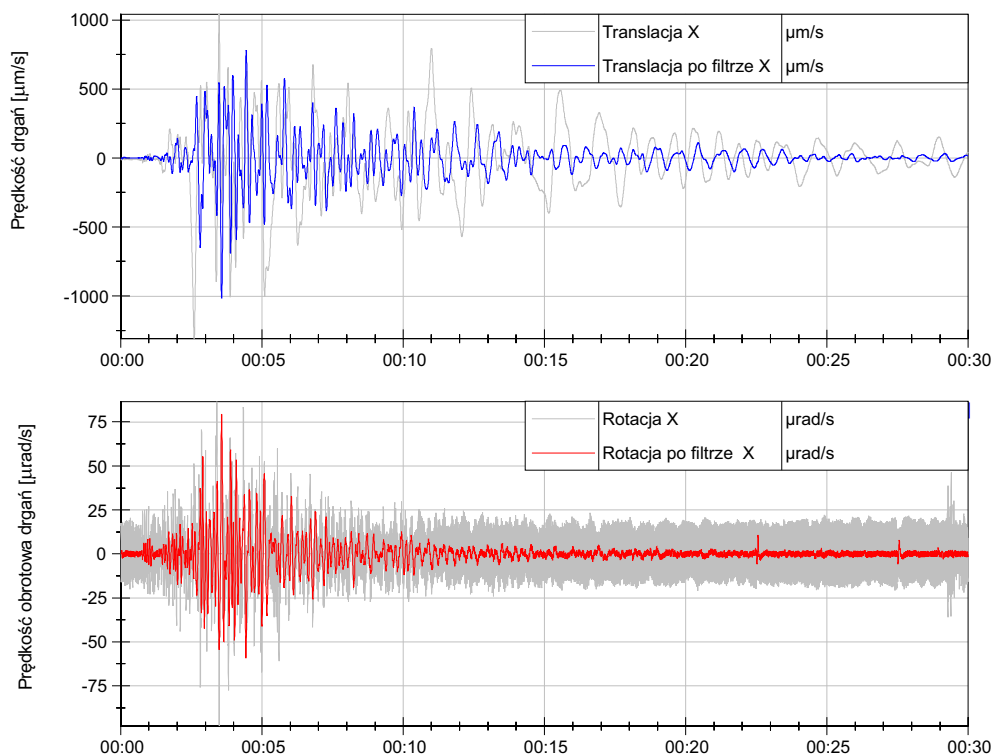
Data wystąpienia	2017.01.16	2017.02.13	2017.03.02	2017.03.04
Energia wstrząsu [J]	$1,20 \times 10^6$	$1,20 \times 10^7$	$1,70 \times 10^6$	$1,50 \times 10^7$
Odległość hipocentralna [m]	6 196,12	6 205,92	5 413,75	5 961,79

3.1. Porównanie przebiegów rotacyjnych i translacyjnych w dziedzinie czasu

Aby określić różnicę pomiędzy składowymi rotacyjnymi i translacyjnymi drgań sejsmicznych w dziedzinie czasu, przeanalizowano maksymalne wartości amplitudy drgań zarejestrowanych zdarzeń. Aby zminimalizować stosunek szumu do sygnału, wszystkie przebiegi przefiltrowano z wykorzystaniem środkowoprzepustowego filtra Butterwortha w paśmie częstotliwości 1–50 Hz. Granice przepustowości filtrowania zostały dobrane zgodnie z płaską charakterystyką sejsmometrów rotacyjnych. Efekt filtrowania przedstawiono na rysunku 5.

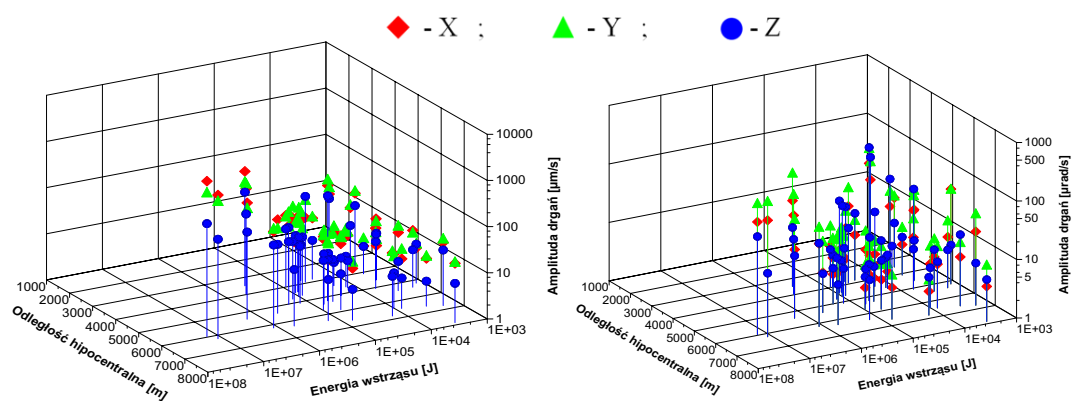
Wartości szczytowej amplitudy prędkości drgań PPV (ang. *Peak Particle Velocity*) i prędkości obrotowej drgań PPAV (ang. *Peak Particle Angular Velocity*) przedstawiono na rysunku 6.

W przypadku składowych translacyjnych, wartość PPV wykazuje tendencje wzrostową wraz ze zwiększającą się energią wstrząsu. Korelacja energii i amplitudy drgań translacyjnych rejestrowanej w poszczególnych kierunkach wynosiła odpowiednio $r = 0,98$ dla kierunku X, $r = 0,99$ dla kierunku Y oraz $r = 0,89$ dla kierunku wertykalnego Z. Mniejszy,



Rys. 5. Sygnał sejsmiczny wstrząsu o energii $1,2 \times 10^7$ J przed (zielony) i po filtrowaniu (niebieski)

Fig. 5. Seismic signal of seismic tremor with energy 1.2×10^7 J of before (green) and after (blue) filtering



Rys. 6. Zarejestrowane wartości PPV (lewa) oraz PPAV (prawa)

Fig. 6. Recorded PPV (left) and PPAV (right) values of ground motion

aczkolwiek widoczny wpływ na wartość maksymalnej amplitudy drgań ma odległość hipocentralna od źródła zdarzenia. Wraz ze wzrostem odległości spada wartość amplitudy drgań, co najlepiej obrazują zarejestrowane wstrząsy o energiach rzędu 10^3 J i 10^4 J. Wyliczone współczynniki korelacji dla składowych horyzontalnych wynoszą odpowiednio $r = 0,16$ dla X oraz $r = 0,17$ dla Y. W przypadku składowej Z, zaobserwowano korelację na niskim poziomie, tj. $r = 0,10$. Podobne wnioski można wysnuć analizując maksymalną wartość prędkości obrotu drgań rotacyjnych. Jak wynika z rysunku 6, wraz ze wzrostem odległości i spadkiem energii, wartość PPAV znacząco spada. Największe wartości PPAV generowane były wstrząsami o energii $1,2 \times 10^7$ J oraz $1,5 \times 10^7$ J. Zaobserwowano również wyraźną korelację między energią wstrząsu, a wartością PPAV składowych horyzontalnych, gdzie współczynnik r wynosił odpowiednio $r = 0,88$ dla kierunku X oraz $r = 0,87$ dla kierunku Y. Drgania w kierunku wertykalnym słabo korelowały z energią wstrząsu ($r = 0,36$). Widoczny jest również większy wpływ odległości hipocentralnej na rejestrowaną wartość amplitudy obrotu aniżeli w przypadku amplitudy przesunięcia. Sytuacja ta może sugerować, że składowe obrotowe drgań sejsmicznych są bardziej tłumione niż składowe translacyjne. Niemniej w obu przypadkach największe wartości PPV, podobnie jak PPAV, zaobserwowano w przypadku wstrząsów wysokoenergetycznych. Minimalne i maksymalne zarejestrowane wartości PPV oraz PPAV przedstawiono w tabeli 2.

TABELA 2. Wartości maksymalne i minimalne zarejestrowanych PPV i PPAV

TABLE 2. Maximum and minimum values of PPV and PPAV

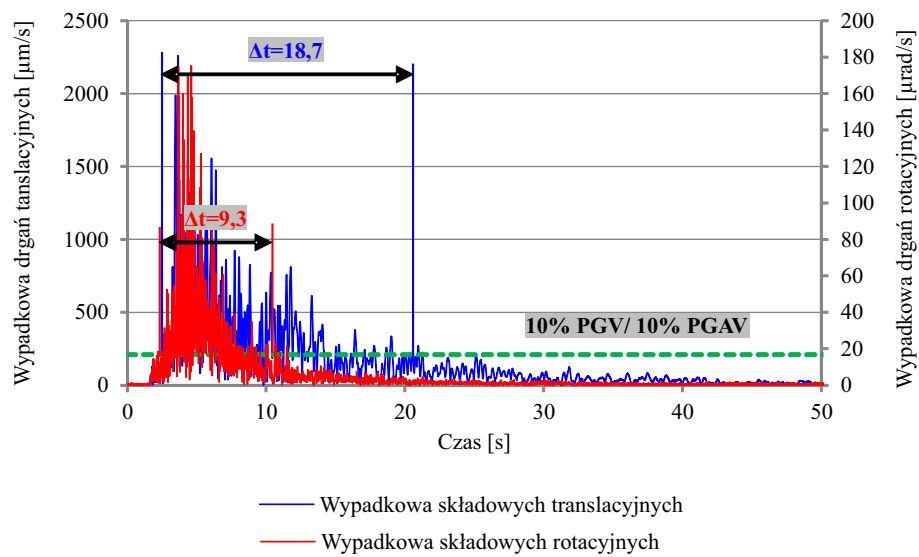
Kierunek rejestracji	RX	RY	RZ	TX	TY	TZ
Jednostka	[μ rad/s]			[μ m/s]		
Minimalna wartość amplitudy drgań	2	2	3	4	5	3
Maksymalna wartość amplitudy drgań	98	198	47	2 330	1 240	280

Istotnym parametrem drgań sejsmicznych, analizowanym w domenie czasu jest również czas trwania wstrząsu. W ramach niniejszego opracowania przeanalizowano czasy trwania wstrząsów o energii przekraczającej 10^5 J. Średnia odległość analizowanych wstrząsów od stanowisk pomiarowych wynosiła 5296,23 m przy odchyleniu standardowym na poziomie 882,88 m. Aby zautomatyzować proces wyznaczania czasu trwania wstrząsu, opracowany został algorytm automatycznie wyznaczający przybliżony czas drgania cząstek gruntu. W celu sprowadzenia obliczeń do jednej wartości dla składowych rotacyjnych i jednej wartości dla składowych translacyjnych, dla każdego z analizowanych wstrząsów wyznaczono parametr PGV (ang. *Peak Ground Velocity*) oraz PGAV (ang. *Peak Ground Angular Velocity*). Przyjęto, że za efektywny czas trwania drgań sejsmicznych można uznać okres, w którym amplituda drgań przekracza 10% amplitudy maksymalnej. W efekcie nowoutworzony algorytm wyznaczał w zapisie wstrząsu dwa punkty, w których wartość PGV przekraczała zakładaną wartość progową. Następnie pomiędzy pierwszym i ostatnim punktem obliczano

różnicę czasu (Δt), którą traktowano jako wynik obliczeń. Przykładowy schemat wyznaczania czasu trwania drgań translacyjnych i rotacyjnych przedstawiono na rysunku 7.

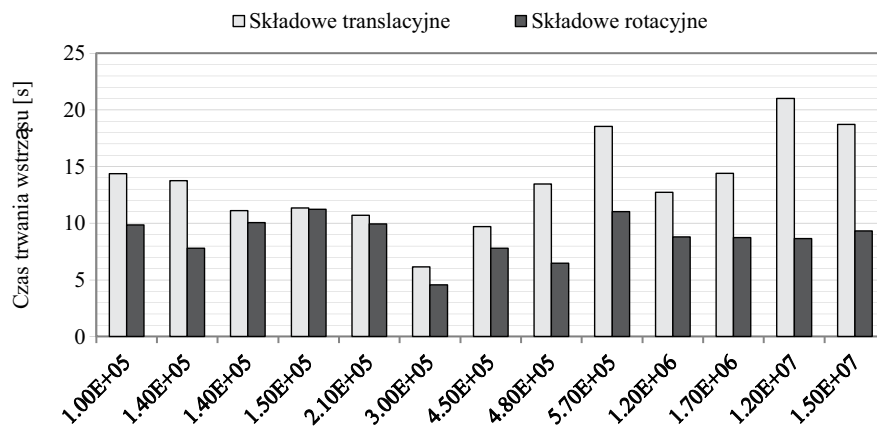
Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 8.

W wyniku analizy stwierdzono, że średni czas trwania drgań rotacyjnych jest o 31% mniejszy niż w przypadku składowych translacyjnych. Odległość hipocentralna była na zbliżonym poziomie, dlatego na tym etapie analizy została pominięta. Zaobserwowano również,



Rys. 7. Schemat wyznaczania czasu trwania wstrząsu

Fig. 7. Scheme of determination of seismic tremor duration



Rys. 8. Wyznaczone czasy trwania analizowanych wstrząsów sejsmicznych

Fig. 8. Calculated duration times of selected seismic tremors

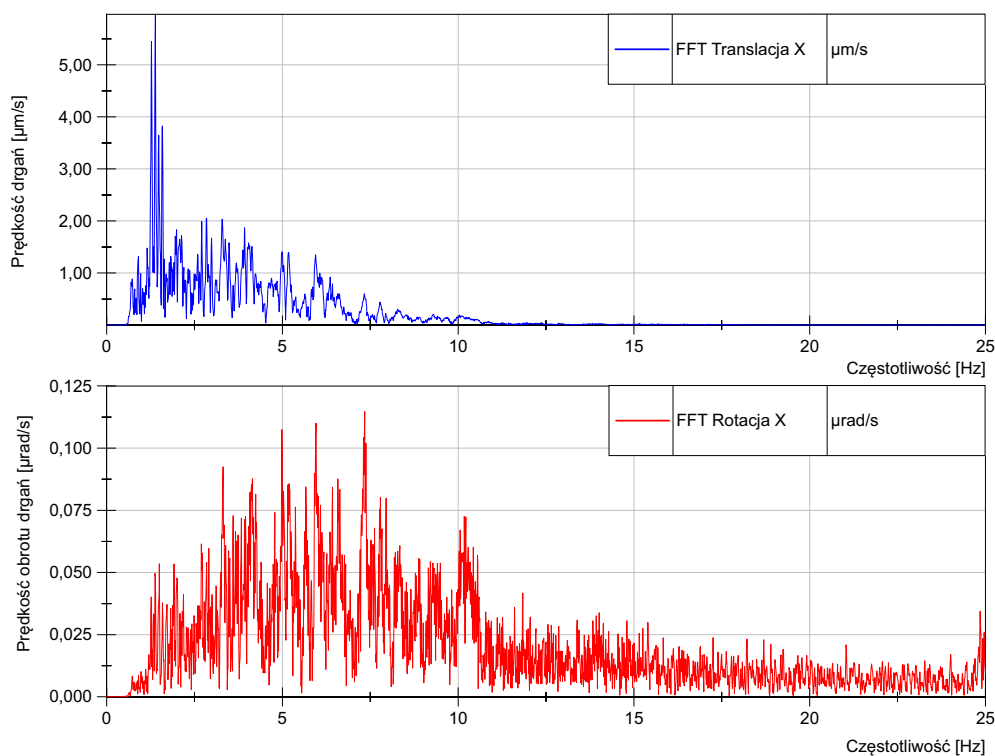
że różnica w czasie trwania drgań wzrasta wraz z energią wstrząsu. Taka sytuacja potwierdza tezę, że składowe obrotowe drgań sejsmicznych są bardziej tłumione aniżeli komponenty translacyjne.

3.2. Analiza widmowa sygnałów sejsmicznych

Aby określić charakterystykę częstotliwościową sygnałów sejsmicznych, wszystkie zarejestrowane wstrząsy poddano procedurze szybkiej transformaty Fouriera (ang. Fast Fourier Transform). W procedurze okienkowania sygnału wykorzystano okno Hamminga. Przykładowy wynik analizy widmowej dla składowej X zarejestrowanej w wyniku wstrząsu o energii $1,2 \times 10^7$ J przedstawiono na rysunku 9.

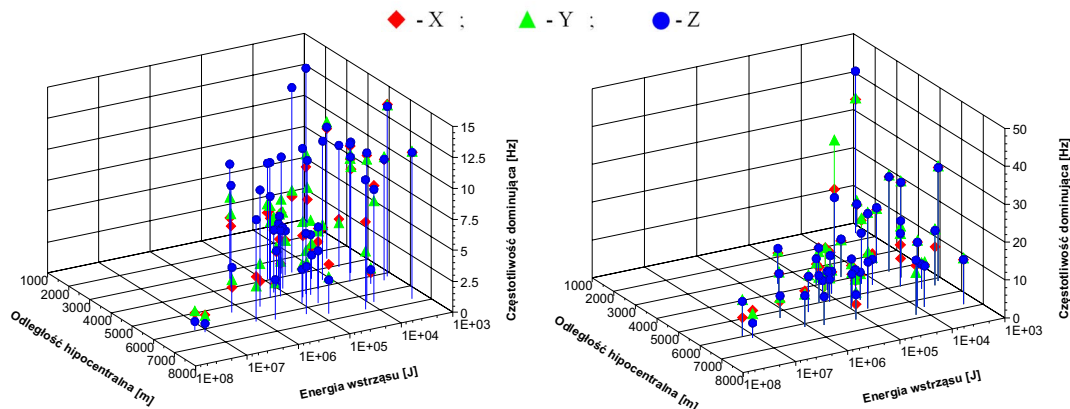
Wyniki analizy w dziedzinie częstotliwości przedstawiono na rysunku 10.

Przeprowadzona analiza FFT wykazała istotne różnice w widmach sygnałów translacyjnych oraz rotacyjnych. Częstotliwości dominujące drgań tych pierwszych mieściły się najczęściej w zakresie 1–15 Hz. Wyliczone częstotliwości wykazywały tendencję wzrostową wraz ze spadkiem odległości, co jest rzeczą naturalną, gdyż skały i grunty,



Rys. 9. Wyniki analizy FFT zapisu wstrząsu o energii $1,2 \times 10^7$ J

Fig. 9. Result of FFT analysis of seismic tremor with energy 1.2×10^7



Rys. 10. Obliczone częstotliwości dominujące dla składowych translacyjnych (lewa) i rotacyjnych (prawa)

Fig. 10. Calculated values of dominant frequencies of translational (left) and rotational (right) ground motion

w obrębie których propagowały fale sejsmiczne, działają na spektrum częstotliwościowe, jak i filtr dolnoprzepustowy. W efekcie im dalej od źródła, tym bardziej wysokie częstotliwości są tłumione. Zaskakujący jest jednak fakt, że mimo iż składowe obrotowe wybranych wstrząsów wykazały analogiczny trend, to zakres obserwowanych częstotliwości znacząco wzrósł, tj. mieścił się przedziale 1–50 Hz. Widoczny jest również istotny wpływ odległości na częstotliwość dominującą składowych rotacyjnych drgań, co potwierdzają wyliczone współczynniki korelacji wynoszące odpowiednio $r = -0,43$ dla kierunku X, $r = -0,37$ dla kierunku Y oraz $r = -0,53$ dla kierunku Z. W przypadku drgań translacyjnych wpływ ten był znacząco mniejszy i wynosił $r = 0,11$ dla kierunku X, $r = -0,02$ dla kierunku Y oraz $r = -0,22$ dla kierunku Z.

Wnioski

W niniejszym opracowaniu przedstawiono wyniki pilotażowych pomiarów sześciu składowych wstrząsów indukowanych działalnością górniczą na terenie kopalń LGOM. Łącznie zarejestrowano 49 wstrząsów, spośród których jedynie 4 były zjawiskami wysokoenergetycznymi. Zarejestrowana w wyniku przejścia fali sejsmicznej maksymalna prędkość obrotu cząstek gruntu, nie przekraczała wartości 200 $\mu\text{rad/s}$, przy jednoczesnym ruchu translacyjnym na poziomie 2330 $\mu\text{m/s}$. Zaobserwowano również różnice w zakresie częstotliwości dominujących. Analiza widmowa wykazała, że składowe rotacyjne we wszystkich 49 przypadkach charakteryzowały się wyższą wartością częstotliwości dominującej. Wyraźne rozbieżności wykazano również w oparciu o analizę czasu trwania poszczególnych składowych sygnału sejsmicznego. Obserwowane drgania rotacyjne wygaszały się wcześniej aniżeli składowe translacyjne. Ostatecznie, w wyniku wykonanych analiz stwierdzono,

że parametry składowych rotacyjnych drgań sejsmicznych wykazują znaczące różnice w odniesieniu do standardowych pomiarów translacyjnych. Pozornie niewielka wartość obrotu może nieść ze sobą wiele istotnych informacji w zakresie propagacji fal sejsmicznych oraz może być krokiem milowym w zakresie analiz oddziaływania dynamicznego na obiekty. Przepuszczalnie, szczególnie wartościowe informacje będzie można uzyskać w wyniku analiz wstrząsów wysokoenergetycznych rejestrowanych w bliskim polu falowym. Wobec tego, w celu określenia rzeczywistego znaczenia składowych rotacyjnych w aspekcie ich szkodliwości, konieczne jest prowadzenie dalszych, wieloletnich pomiarów.

Literatura

- Chin-Jen i in. 2008 – Chin-Jen, L., Chun-Chi, L. i Lee, W.H.K. 2008. Recording Rotational and Translational Ground Motions of Two TAIGER Explosions in Northeastern Taiwan on 4 March. *Bulletin of the Seismological Society of America* 99(2B), s. 1237–1250.
- Dulińska, J. i Zięba, A. 2010. Metody oceny wpływu wstrząsów górniczych na wybrane budowle wielkogabarytowe. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki. *Czasopismo Techniczne. Budownictwo* R. 107, z. 3-B, s. 31–42.
- Gordon i in. 1970 – Gordon, D.W., Bennett, T.J., Herrmann, R.B. i Rogers, A.M. 1970. The south-central Illionis earthquake of November 9, 1968 macroseismic studies. *Bulletin of the Seismological Society of America* 60(3), s. 953–971.
- Grzebyk i in. 2015 – Grzebyk, W., Mertuszka, P. i Stolecki, L. 2015. Characteristics of the vibratory motion of a transaction and rotating character coming from mine seismic quakes. *Wiadomości Górnicze* R. 66, z. 2, s. 97–103.
- Grzebyk i in. 2017 – Grzebyk, W., Jaśkiewicz-Proć, I. i Stolecki, L. 2017. Szacowanie głębokości położenia ognisk wstrząsów na podstawie wskaźnika energetycznego EWG. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energia PAN* nr. 101, s. 33–43.
- Hart i in. 1975 – Hart, G.C., DiJulio, R.M. i Lew, M. 1975. Torsional response of high rise buildings. *ASCE. Journal of structure division* 101, s. 397–415.
- Huang i in. 2000 – Huang, B.S., Liu, C.C., Lin, C.R., Wu, C.F. i Lee, W.H.K. 2000. Measuring Mid- and Near-Field Rotational Ground Motions in Taiwan.
- Jaśkiewicz-Proć, I. 2014. Korelacja oceny oddziaływania drgań według skali GSI-2004/11 z uszkodzeniami budynków po wstrząsach górniczych w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym. *Przegląd Górniczy* 70(6), s. 14–23.
- Jaśkiewicz-Proć, I. 2012. Porównanie prognozowanych i zarejestrowanych parametrów drgań od wstrząsów górniczych w bliskich odległościach epicentralnych na terenie LGOM. *Czasopismo Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie* 7, s. 20–25.
- Ju i in. 2000 – Ju, L., Blair, D.G. i Zhao, C. 2000. Detection of gravitational waves. *Rep. Prog. Phys.* 63, s. 1317–1427.
- Kaláb i in. 2012 – Kaláb, Z., Knejzlik, J. i Lednická, M. 2012. Observation of rotational component in digital data of mining induced seismic events. *Górnictwo i Geologia* 7(1), s. 75–85.
- Lee i in. 2011 – Lee, W.H.K., Evans, J.R., Bor-Shouh, Huang, Hutt, Ch.R., Chin-Jen, Lin, Chun-Chi, Liu i Nigbor, R.L. 2011. *Measuring rotational ground motions in seismological practice*, s. 1–27.
- Maciąg, E., 2005. Ocena szkodliwości drgań budynków od wstrząsów górniczych na podstawie drgań ich fundamentów czy drgań gruntu. Wydawca Fundacja PZITB „Inżynieria i Budownictwo” *Czasopismo Inżynieria i Budownictwo* R. 61, nr 12, s. 670–677.
- Schmelzbach i in. 2018 – Schmelzbach, C., Donner, S., Igel, H., Sollberger, D., Taufiqurrahman, T., Bernauer, F., Häusler, M., Van Renterghem, C., Wassermann, J. i Robertsson, J. 2018. Advances in 6C seismology: Applications of combined translational and rotational motion measurements in global and exploration seismology. *Geophysics* 83(3), s. 53–69.
- Suryanto, W. 2006. Rotational Motions in Seismology, Theory and Application. Dissertation, LMU München: Faculty of Geosciences.

- Teisseyre i in. 2006 – Teisseyre, R., Takeo, M. i Majewski, E. 2006. Earthquake Source Asymmetry, Structural Media and Rotation Effects. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- Teisseyre, R. 2010. Why rotation seismology: Confrontation between classic and asymmetric theories. *Second IWGoRS Workshop*, October 11–13, Prague, Czech Republic.
- Torunbalci, N. i Ozpalkanlar, G. 2008. Evaluation of earthquake response analysis methods for low-rise base isolated buildings. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering* October 12–17, 2008, Beijing, China.
- Trifunac, M.D. 2009. Rotations in Structural Response. *Bulletin of the Seismological Society of America* 99, s. 968–979.
- Zembaty i in. 2017 – Zembaty, Z., Mutke, G., Nawrocki, D. i Bobra, P. 2017. Rotational Ground-Motion Records from Induced Seismic Events. *Seismological Research Letters* 88(12).
- Zerva, A. i Zhang, O. 1997. Corellation patterns in characteristic of spatially variable seismic ground motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 26, s. 19–39.

