



Zeszyty Naukowe

Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią  
Polskiej Akademii Nauk

rok 2017, nr 97, s. 163–172

Janusz MIREK\*, Łukasz RUDZIŃSKI\*\*

## **LUMINEOS – nowoczesna sieć sejsmologiczna do monitorowania sejsmiczności i poziomu drgań gruntu na obszarze eksploatacji złóż miedzi w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym**

Streszczenie: Legnicko-Głogowski Okręg Miedziowy od lat siedemdziesiątych XX wieku jest obszarem intensywnej eksploatacji złóż miedzi. Prowadzone prace górnicze spowodowały pojawienie się sejsmiczności indukowanej, a to z kolei pociągnęło za sobą konieczność prowadzenia obserwacji za pomocą podziemnych sieci sejsmologicznych. W połowie lat dziewięćdziesiątych XX wieku, z uwagi na duże szkody obiektów znajdujących się na powierzchni wywołane drganiami gruntu pochodzenia sejsmicznego, pojawiły się naziemne stacje sejsmometryczne (akcelerometryczne). Monitorują one poziom drgań zarówno gruntu, jak i samych obiektów (Mirek 2002). Przyczyniło się to do poszerzenia wiedzy w zakresie charakteru drgań gruntu, jak i odporności obiektów budowlanych.

W ostatnich latach zagrożenia antropogeniczne, do których zalicza się sejsmiczność indukowaną działalnością górniczą, wzbudzają coraz większe zainteresowanie. Żeby móc rozwijać metody badania fizyki źródła sejsmicznego, analizy wpływu drgań na powierzchnię czy hazardu sejsmicznego, należy także rozwijać i modernizować sieci pomiarowe. W ramach projektu IS-EPOS „Cyfrowa przestrzeń badawcza sejsmiczności indukowanej dla celów EPOS”, w latach 2014–2015, rozbudowano nowoczesną sieć sejsmologiczną LUMINEOS składającą się obecnie z 15 sejsmometrów i 10 akcelerometrów z możliwością dalszej rozbudowy. Sieć ukierunkowana jest zarówno na obserwację zjawisk sejsmicznych, jak i obserwację poziomu drgań gruntu. Dane uzyskiwane z sieci LUMINEOS dopełniają istniejące kopalniane sieci podziemne (Koziarz i Szłapka 2010) oraz powierzchniowe sieci akcelerometryczne (Mirek i in. 2006; Mirek 2005), a także pozwalają na prowadzenie zaawansowanych analiz sejsmologicznych.

Słowa kluczowe: monitorowanie sejsmiczności, wstrząsy indukowane działalnością górniczą

\* Dr inż., \*\* Dr, Instytut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa;  
e-mail: jmirek@igf.edu.pl, rudzin@igf.edu.pl

## **LUMINEOS – modern seismological network for monitoring seismic activity and the level of ground vibration in the area of Legnica-Głogów Copper Mine District**

**Abstract:** Since the 1970s, the Legnica-Głogów Copper District has an area of intensive mining of copper. Mining activities resulted in the appearance of induced seismic activity. This situation caused the necessity of setting an underground seismological network. In the mid-1990s, due to the great damage of objects on the surface caused by the ground vibrations due to mining tremors, a surface strong motion seismic network equipped with accelerometers was created. They monitor the vibration levels of both the land and the buildings themselves. This contributed to a better knowledge of the nature of ground vibration and the resistance of objects. In recent years, anthropogenic threats, which include seismicity induced by mining activities, are arousing more and more interest. To be able to develop test methods for seismic source physics, the analysis of the impact of vibrations on the surface and the seismic hazard, network measurement should also be developed and modernized. In the years 2014–2015, the IS-EPOS “Digital research space of induced seismicity for EPOS purposes” project, extended the LUMINEOS modern seismological network presently consisting of 15 seismometers and 10 accelerometers, with the possibility of additional further expansion. The data obtained from the LUMINEOS network complements the existing underground mining network and surface strong motion network. This allows for an advanced seismic analysis.

**Keywords:** seismic monitoring, mining tremors

### **Wprowadzenie**

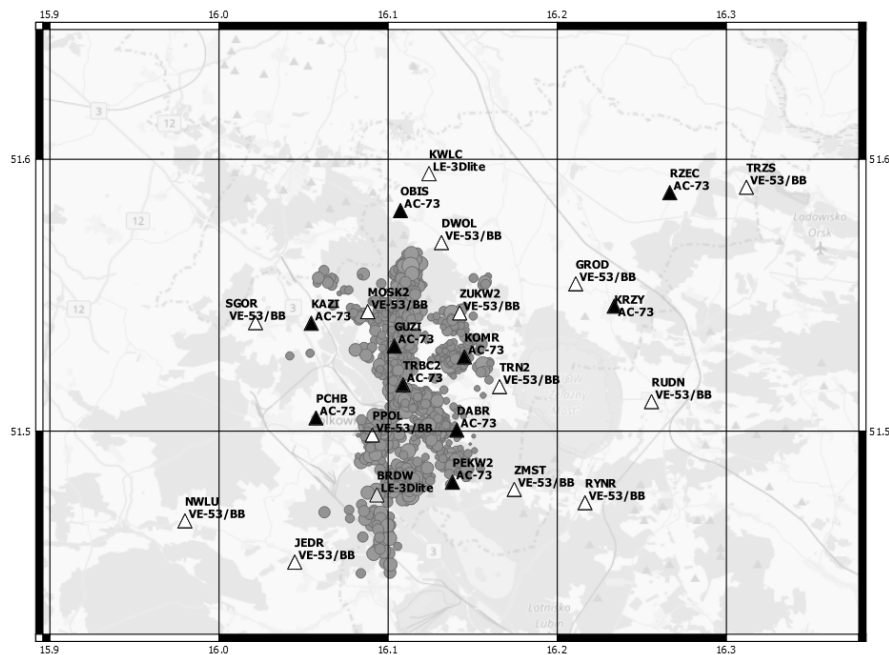
Cyfrowe sieci sejsmologiczne stanowią podstawę rejestracji zjawisk sejsmicznych od lat 80. XX wieku. W tym czasie powstało wiele sieci dedykowanych rejestracji sejsmiczności naturalnej czy to tektonicznej, czy wulkanicznej. Niemniej, w porównaniu z sejsmicznością naturalną, nie było znacznego zaangażowania środków do prowadzenia obserwacji nowoczesnymi sieciami sejsmologicznymi obszarów występowania sejsmiczności indukowanej. W ostatnim czasie, szczególnie zaś od początku drugiej dekady XX wieku, zauważalny jest wzrost zainteresowania środowiska naukowego oraz inżynierskiego zjawiskami antropogenicznymi wywołanymi podziemną działalnością człowieka (Grigoli i in. 2017). Znaczący wzrost nakładów finansowych na obserwacje sejsmiczności indukowanej zaowocował uruchomieniem na świecie kilku nowoczesnych sieci sejsmicznych dedykowanych jej obserwacji. Cechą charakterystyczną nowoczesnej sieci sejsmicznej prowadzonej na potrzeby obserwacji sejsmiczności antropogenicznej jest powiązanie ze sobą rejestracji akcelerometrycznych oraz sejsmometrycznych, w tym w szczególności na niższych częstotliwościach (Grigoli i in. 2017). Opisywana w artykule sieć LUMINEOS w pełni wyczerpuje stawiane przed tego typu infrastrukturą wymogi.

Budowa sieci LUMINEOS zapoczątkowana została w roku 2013 postawieniem sejsmometrów krótkookresowych Lennartz Electronics 3DLite z rejestratorami Net Data Logger produkcji Instytutu Geofizyki PAN. Sieć zlokalizowana została na terenie Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego w rejonie zbliżonym do pola wydobywczego Zakładów Górniczych Rudna w Polkowicach, KGHM Polska Miedź S.A. Ilość stacji wahała się od 6 do 9 w różnych okresach. Było to wciąż niewystarczające do przeprowadzania zaawansowanych analiz z należytą dokładnością. Modernizację sieci przewidziano w przygotowywanym wówczas projekcie „Cyfrowa przestrzeń badawcza sejsmiczności indukowanej dla celów EPOS”. Projekt uzyskał finansowanie w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka i został zrealizowany w okresie od 01.10.2013 do 31.12.2015. Projekt składał się z wielu zadań, a jedno z nich przewidywało modernizację sieci LUMINEOS. Założo-

no instalację 10 nowych sejsmometrów i 10 akceleratorów na terenie monitorowanym przez sieć LUMINEOS. W trakcie realizacji projektu zwiększono o 6 liczbę zakupionych sejsmometrów przeznaczonych do rozbudowy sieci. Aktualnie sieć LUMINEOS składa się z 10 akceleratorów i 15 sejsmometrów, a także projektowana jest dalsza jej rozbudowa.

### 1. Budowa i topologia sieci LUMINEOS

Sieć sejsmologiczna LUMINEOS składa się aktualnie z dziesięciu akceleratorów AC-73 z rejestratorami GMSPlus firmy GeoSIG, trzynastu sejsmometrów VE-53/BB z rejestratorami GMSPlus firmy GeoSIG oraz dwóch sejsmometrów Lennartz Electronics 3DLite z rejestratorami Net Data Logger produkcji Instytutu Geofizyki PAN, które planuje się wymienić na sejsmometry VE-53/BB. Akcelerometry AC-73 mają dynamikę 165 dB, czułość 2.5–20 V/g i płaskie pasmo przenoszenia 0–200 Hz. Sejsmometry GeoSIG VE-53/BB o dynamice >125 dB i czułości 1000 V/m/s, rejestrują prędkość drgań gruntu w płaskim zakresie częstotliwości od 0,2 do 100 Hz, podczas gdy sprzęt Lennartza z rejestratorem NDL produkcji polskiej w zakresie od 1 do 100 Hz. Rozmieszczenie stanowisk sieci przedstawiono na rysunku 1. Białe trójkąty oznaczają stanowiska z zainstalowanymi sejsmometrami, czarne



Rys. 1. Rozmieszczenie stanowisk sieci LUMINEOS wraz z zaznaczonymi epicentrami zjawisk zarejestrowanych w okresie od 10.12.2013 do 11.07.2016 o energii większej niż  $1E3$  [J]. Trójkąty białe oznaczają sejsmometry, trójkąty czarne akcelerometry, kółka epicentra wstrząsów (IS-EPOS Platform)

Fig. 1. The localization of the LUMINEOS seismic network and epicenters of the events with energy higher than  $1E3$  [J] recorded between 2013-12-10 to 2016-07-11. White triangles – seismometers – accelerometers, circles – seismic event epicenters (IS-EPOS Platform, last access – June, 2017)

trójkąty stanowiska z zainstalowanymi akcelerometrami. Kółkami zaznaczono epicentra zlokalizowanych przez sieć wstrząsów o energiach powyżej  $1E3$  [J]. W okresie od grudnia 2013 do lipca 2016 roku takich zjawisk zarejestrowano ponad dwa tysiące (rys. 1).

Tabela 1 przedstawia zestawienie stacji wchodzących w skład sieci LUMINEOS, zawierające lokalizację stacji, jej kod, typ czujnika oraz częstotliwość próbkowania, która dla sejsmometrów wynosi 100 Hz, a dla akcelerometrów 250 Hz.

TABELA 1. Zestawienie stacji sejsmologicznych sieci LUMINEOS

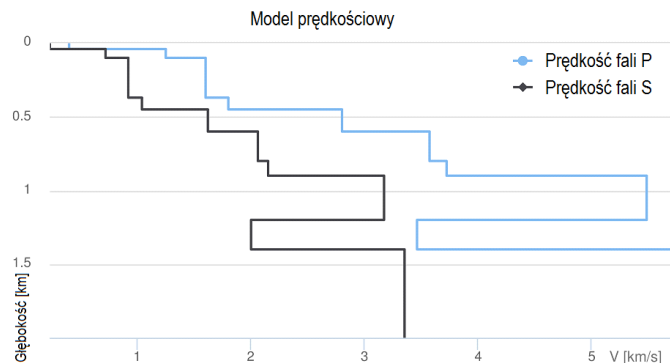
TABLE 1. List of the LUMINEOS network seismic stations

Lp.	Długość geograficzna	Szerokość geograficzna	Kod stacji	Czujnik	Częstotliwość próbkowania [Hz]
1	16.1406	51.5002	DABR	AC-63	250.0
2	16.1036	51.5312	GUZI	AC-63	250.0
3	16.0544	51.5396	KAZI	AC-63	250.0
4	16.1451	51.5272	KOMR	AC-63	250.0
5	16.2338	51.5459	KRZY	AC-63	250.0
6	16.0572	51.5047	PCHB	AC-63	250.0
7	16.138	51.481	PEKW2	AC-63	250.0
8	16.2667	51.5877	RZEC	AC-63	250.0
9	16.1088	51.5169	TRBC2	AC-63	250.0
10	16.1072	51.5811	OBIS	AC-63	250.0
11	16.0933	51.4763	BRDW	LE-3Dlite	100.0
12	16.1315	51.5693	DWOL	VE-53/BB	100.0
13	16.211	51.5541	GROD	VE-53/BB	100.0
14	16.0446	51.4515	JEDR	VE-53/BB	100.0
15	16.1241	51.5947	KWLC	LE-3Dlite	100.0
16	16.0878	51.5439	MOSK2	VE-53/BB	100.0
17	15.9796	51.4667	NWLU	VE-53/BB	100.0
18	16.0906	51.4984	PPOL	VE-53/BB	100.0
19	16.2559	51.5107	RUDN	VE-53/BB	100.0
20	16.2165	51.4734	RYNR	VE-53/BB	100.0
21	16.0214	51.5398	SGOR	VE-53/BB	100.0
22	16.1659	51.5162	TRN2	VE-53/BB	100.0
23	16.3121	51.5897	TRZS	VE-53/BB	100.0
24	16.1746	51.4783	ZMST	VE-53/BB	100.0
25	16.1423	51.5434	ZUKW2	VE-53/BB	100.0

## 2. Dane z sieci LUMINEOS

Do najważniejszych elementów nowoczesnej sieci sejsmicznej należy możliwość wymiany oraz udostępnienia danych cyfrowych dla szerokiego grona specjalistów w danej dziedzinie. O ile tego typu możliwości są typowe dla dużej liczby sieci sejsmometrycznych

skupionych na obserwacjach sejsmiczności naturalnej (np. w takich miejscach jak portal ORFEUS-EIDA), o tyle w przypadku sieci rejestrującej sejsmiczność indukowaną nie jest to spotykane. Nowatorskie podejście zbudowane w ramach projektu „Cyfrowa przestrzeń badawcza sejsmiczności indukowanej dla celów EPOS” wychodzi naprzeciw wymaganiom środowiska naukowego, inżynierskiego i społecznego. Zbudowana została w tym celu platforma prototypowa *Thematic Core Service of Antropogenic Hazards for European Plate Observation System* (EPOS). Platforma jest dostępna w sieci internetowej pod adresem <http://tcs.ah-epos.eu/>. Dane rejestrowane przez sieć sejsmologiczną LUMINEOS wchodzi w skład epizodu sejsmiczności indukowanej Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego *LGCD: regional seismicity and ground motion associating underground hard rock mining*. Epizod sejsmiczności indukowanej to obiekt platformy grupujący całą informację dotyczącą sejsmiczności związanej z poszczególnymi obserwowanymi rejonami. Dane z sieci są ogólnodostępne dla użytkowników, którzy zarejestrują się na platformie. Oprócz danych sejsmologicznych użytkownik ma do dyspozycji wiele dodatkowych danych, jak np. model prędkości dla danego regionu (np. model prędkościowy obszaru działania sieci LUMINEOS – rys. 2). Platforma umożliwia nie tylko przeglądanie danych, ale także zawiera wyspecjalizowane oprogramowanie umożliwiające przetwarzanie danych, między innymi



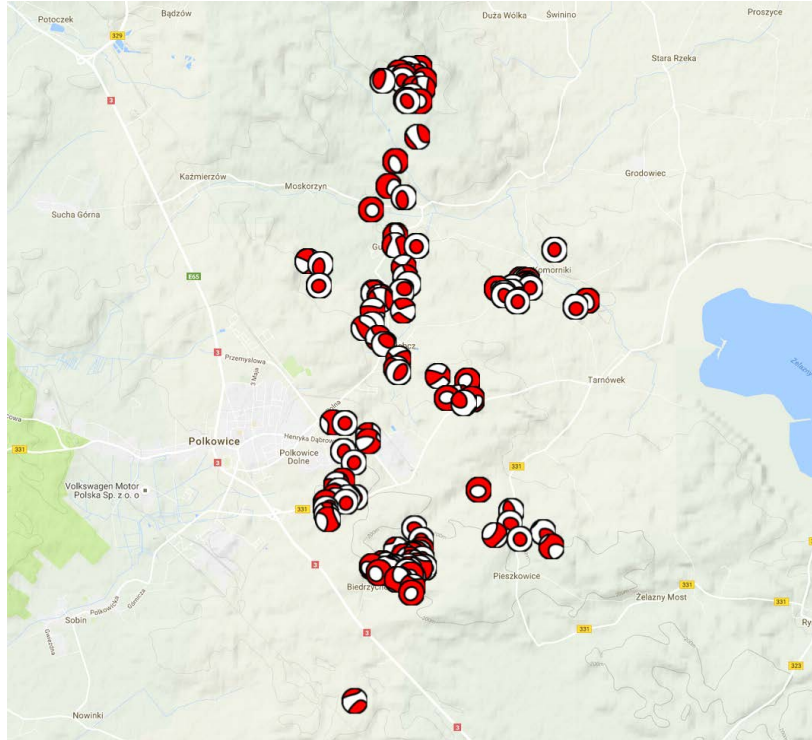
Rys. 2. Model prędkości opracowany dla sieci sejsmologicznej LUMINEOS na podstawie Dec i in. (2011) oraz Król (1998)

Fig. 2. Velocity model for the LUMINEOS seismic network

lokalizację zjawisk czy wyznaczanie mechanizmu ogniska (rys. 3) z pomocą algorytmu opartego na analizie pierwszych wstąpień fali P.

### 3. Przykład zastosowania zapisów sieci LUMINEOS w zaawansowanych badaniach naukowych

Docelowym elementem sieci sejsmologicznej jest możliwość zastosowania zarejestrowanych przez nią danych do zaawansowanych badań naukowych. W niniejszym artykule ograniczymy się jedynie do pokazania przykładowego rozwiązania mechanizmu ogniska z dnia 08.03.2016 z godziny 03:52:08.9, lokalizacja 51.52N; 16.15E; magnituda  $M_w$  3.0.



Rys. 3. Mechanizmy wstrząsów o energii powyżej  $1E6$  [J] zarejestrowanych w okresie od 10.12.2013 do 11.07.2016 przez sieć LUMINEOS (IS-EPOS Platform, ostatnie wejście na stronę internetową – czerwiec 2017)

Fig. 3. Focal mechanism of seismic events with energy higher than  $1E6$  [J] recorder by the LUMINEOS seismic network between 2013-12-10 to 2016-07-11 (IS-EPOS Platform, last accessed – June, 2017)

W tym celu posłużyliśmy się sejsmogramami sieci LUMINEOS, lokalnym modelem prędkości (Dec i in. 2011; Król 1998, patrz rys. 2) oraz metodą inwersji tensora sejsmicznego opartej na inwersji pełnego pola falowego z użyciem oprogramowania KIWI-tools (<http://kinherd.org>, Heimann 2011). Badania te są obecne w najnowszej literaturze tematu (Dreger i in. 2008; Sen i in. 2013; Whidden i in. 2013; Rudziński i in. 2016) i wypierają, w miarę powstawania trójskładowych sieci o większej dynamice, metody oparte na analizie pierwszej części sygnału sejsmicznego (Rudziński 2013). Warto podkreślić, że mimo wielu prac z wykorzystaniem sieci istniejących: kopalnianych (np. Lizurek oraz Wiejacz 2011, przykładowy opis sieci: Koziarz oraz Szłapka 2010) czy też szerokopasmowych (np. Rudziński i in. 2016) – tego typu podejście nie byłoby możliwe bez powstania sieci LUMINEOS.

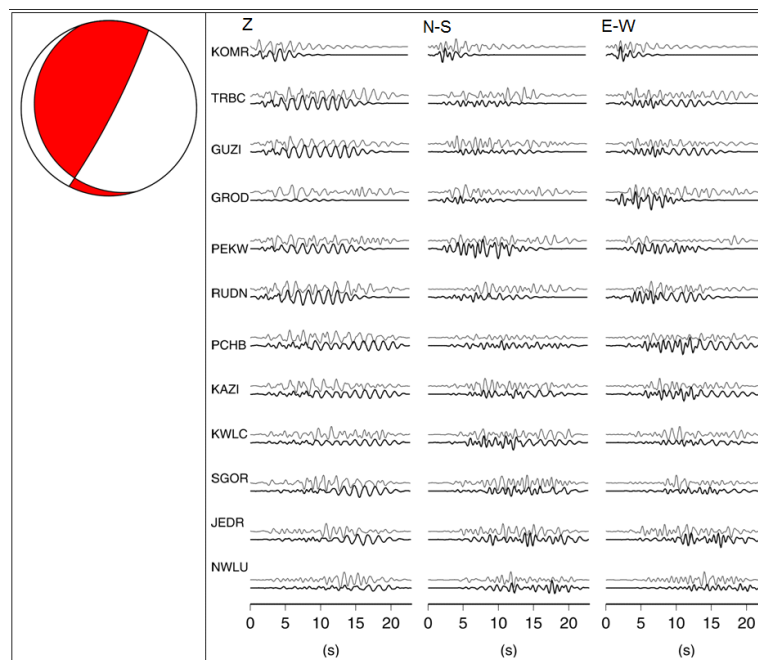
Nowoczesne, trójosiowe sieci sejsmologiczne rejestrujące drgania gruntu z dużą dynamiką oraz w szerokim paśmie częstotliwości (dolny próg płaskiej odpowiedzi poniżej 100 s) pozwalają na prowadzenie nieograniczonych analiz sejsmologicznych. Jednym z elementów fizyki źródła sejsmicznego, dla którego jakość zapisów musi być bardzo dobra, są prace dotyczące wyznaczania mechanizmów ogniskowych wstrząsów. Pomimo różnej metodologii, w tym również opartej na analizie pierwszych wstępień fali sejsmicznej na poszczególnych



czujnikach, jedynie informacje zawarte w pełnym i prawidłowo zapisanym sygnale sejsmicznym są źródłem istotnych informacji o ognisku i jego naturze (Lizurek i in. 2015; Rudziński i in. 2016). W omawianym przykładzie pokazujemy, jak zapisy sieci sejsmologicznej LUMINEOS mogą posłużyć do bliższego poznania natury zjawisk indukowanych działalnością górnictwem.

Jednym ze sposobów wyznaczania mechanizmów ogniskowych jest inwersja tensora momentu sejsmicznego z wykorzystaniem pełnego pola falowego (np. Dziewoński 1981; Cesca i in. 2010; Rudziński 2013; Rudziński i in. 2016). Metoda ta jest obecnie uważana za najbardziej wiarygodną w ocenie procesów pęknięcia górotworu w sejsmologii z uwagi na analizę wszystkich informacji zawartych w zapisie sejsmicznym. W ten sposób osiąga się znacznie większe możliwości w porównaniu do metod opartych na inwersji pierwszych wstąpień fali, które znalazły pewne najprostsze zastosowania w polskich warunkach jak na przykład: wyznaczanie płaszczyzn nodalnych uskoku czy też rozróżnienie pomiędzy zjawiskami o mechanizmie ścinającym i nieścinającym (np. Lizurek i Wiejacz 2011; Wojtecki i Dzik 2013). Zastosowanie sieci LUMINEOS pozwala na rozpoczęcie prac z pełnym sejsmogramem, które w obecnej fazie dają obiecujące rezultaty.

Na rysunku 4 przedstawiony został przykład wykorzystania zapisów sieci LUMINEOS w postaci dopasowania sejsmogramów obserwowanych oraz syntetycznych dla wybranego



Rys. 4. Mechanizm przykładowego zjawiska sejsmicznego z obszaru działania sieci LUMINEOS. Rysunek pokazuje najlepsze rozwiązanie DC oraz porównanie sejsmogramów zarejestrowanych przez Sieć LUMINEOS (szare sygnały) z sejsmogramami syntetycznymi (czarne sygnały) obliczonymi dla tego rozwiązania

Fig. 4. Source mechanism of the selected seismic event occurred on an area monitored by the LUMINEOS network. The figure shows the best DC solution with a comparison between data (gray traces) recorded by the Lumineos Network and synthetics (black traces) calculated for the given solution

wstrząsu górniczego z dnia 08.03.2016. Rozwiązanie uzyskano w dwóch krokach (Cesca i in. 2010), przy czym w pierwszym kroku płaszczyzny nodalne uzyskano przy najlepszym dopasowaniu spektrów amplitudowych. W drugim kroku, w inwersji sejsmogramów w domenie czasu uzyskano informacje o strefach kompresji i tensji. W obu krokach zastosowano filtr pasmowy 0,6–1,7 Hz. Pasma to dało najmniejszy błąd niedopasowania w inwersji oraz odpowiadało części spektrum o największej energii.

### Podsumowanie

Sieć LUMINEOS jest nowoczesną siecią seismologiczną ukierunkowaną na obserwacje związane z sejsmicznymi zagrożeniami antropogenicznymi będącymi wynikiem działalności górniczej w rejonie eksploatacji złóż miedzi w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym. Aktualnie sieć składa się z dziesięciu akcelerometrów i piętnastu sejsmometrów. Dane z sieci są ogólnodostępne dla użytkowników na platformie cyfrowej *Thematic Core Service of Antropogenic Hazards for European Plate Observation System (Platforma IS-EPOS)*. Dane rejestrowane przez sieć tworzą osobny epizod sejsmiczności indukowanej i mogą być przetwarzane bezpośrednio na platformie. Bardzo dobra jakość sieci i rejestracji stanowi podstawę do zaawansowanych badań naukowych nad charakterem sejsmiczności indukowanej, oddziaływaniem na powierzchnię, fizyką źródła, jak i hazardu sejsmicznego.

Praca została sfinansowana ze środków statutowych Instytutu Geofizyki PAN o numerze 3841/E-41/S/2017.

### Literatura

- Cesca i in. 2010 – Cesca, S., Heimann, S., Stammler, K. i Dahm, T. 2010. Automated procedure for point and kinematic source inversion at regional distances. *J. Geophys. Res.* 115, B6, B06304, DOI: 10.1029/2009JB006450.
- Dec 2011 – Dec, J., Pietsch, K. i Marzec, P. 2011. Application of seismic methods to identify potential gas concentration zones at the Zechstein Limestone level in the “Rudna” mining area, SW Poland. *Ann. Soc. Geol. Pol.* 81, 1, s. 63–78.
- Dreger i in. 2008 – Dreger, D.S., Ford, S.R. i Walter, W.R. 2008. Source analysis of the Crandall Canyon, Utah, mine collapse. *Science* 321, 217, DOI:10.1126/science.1157392.
- Grigoli i in. 2017 – Grigoli, F., Cesca, S., Priolo, E., Rinaldi, A.P., Clinton, J.F., Stabile, T.A., Dost, B., Garcia Fernandez, M., Wiemer, S. i Dham, T. 2017. Current challenges in monitoring, discrimination and management of induced seismicity related to underground industrial activities: a European perspective. *Reviews of Geophys.*, DOI:10.1002/2016RG000542.
- Heimann, S. 2011. *A robust method to estimate kinematic earthquake source parameters*. Praca doktorska, University of Hamburg, Niemcy.
- Koziarz, E. i Szapka, M. 2010. Kierunki dalszego rozwoju informatycznego systemu do bezpośredniej lokalizacji zjawisk dynamicznych w O/ZG „Rudna” KGHM „Polska Miedź” SA. *Wiadomości Górnicze* 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.
- Lizurek, G. i Wiejacz, P. 2011. Moment Tensor Solution and Physical Parameters of Selected Recent Seismic Events at Rudna Copper Mine. *GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences* T. 2, s. 11-19, DOI: 10.1007/978-3-642-19097-1\_2.
- Lizurek i in. 2015 – Lizurek, G., Rudziński, Ł. i Plesiewicz, B. 2015. Mining Induced Seismic Event on an Inactive Fault. *Acta Geophysica* t. 63, z. 1, s. 176–200, DOI: 10.2478/s11600-014-0249-y.



- Mirek, J. 2002: SEJS-NET: wide area network system for ground vibration. Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences. vol. M-24, s. 181–185.
- Mirek, J. 2005: Strong ground motion monitoring network in the Legnica–Głogów Copper Mining District. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, s. 145–150.
- Mirek i in. 2006 – Mirek, J., Bocian, S., Bączkowska, M. i Macioszczyk, M. 2006. Strong ground motion monitoring system on the Polkowice Commune territory. Wydawnictwo IGSMiE PAN, *Sympozja i Konferencje* nr 67, s. 267–274.
- Platforma IS-EPOS. [Online] Dostępne w: <http://tcs.ah-epos.eu/> [Dostęp: 20.06.2017].
- Rudziński, Ł. 2013. Rozwiązanie mechanizmu zjawiska sejsmicznego poprzez inwersję sejsmogramów. *Przegląd Górniczy* 5, s. 49–55.
- Rudziński i in. 2016 – Rudziński, Ł., Cesca, S. i 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, s. 274–284, DOI:10.1785/0220150150.
- Whidden i in. 2013 – Whidden, K., Rudziński, Ł., Lizurek, G. i Pankow, K.L. 2013. Regional, local, and in-mine moment tensor for the 2013 Rudna Mine collapse, Poland, *Eos Trans. AGU (Fall Meet. 2013)*, Abstract S21-2396.
- Wojtecki, Ł. i Dzik, G. 2013. Charakterystyka mechanizmu ognisk wysokoenergetycznych wstrząsów górotworu występujących podczas eksploatacji ścianowej pokładu 507. *Przegląd Górniczy* 12, s. 17–22, UKD 622.333.83/.84: 622.504.1.

