

Mateusz LASZCZAK\*, Rafał CZARNY\*

## **Charakterystyka szumu sejsmicznego wytworzonego przez pracujący wentylator szybu górniczego**

Streszczenie: Wykorzystanie szumu sejsmicznego jako źródła fal do rozpoznania pola prędkości utworów przypowierzchniowych metodami sejsmiki inżynierskiej jest coraz bardziej popularne. W miejscach zurbanizowanych, gdzie prowadzenie pomiaru przy pomocy większego źródła takiego jak np. kafar jest utrudnione, zastosowanie szumu sejsmicznego jako źródła może być jedynym rozwiązaniem. Przed przystąpieniem do rozpoznania pola prędkości konieczna jest jednak dokładna analiza szumu.

W artykule przedstawiono przykład charakterystyki lokalnego szumu sejsmicznego zarejestrowanego w pobliżu pracującego wentylatora w sąsiedztwie szybu wentylacyjnego kopalni węgla kamiennego. Wyznaczono główne jego parametry: średnią wartość maksymalnych amplitud prędkości i przyspieszenia, częstotliwość dominującą, zakres częstotliwości głównej energii oraz kierunkowość i zasięg oddziaływania. Otrzymane wyniki, a w szczególności opracowany sposób analizy kierunkowości szumu sejsmicznego, mogą poprawić błędy związane z estymacją pola prędkości fal sejsmicznych oraz wspomóc etap projektowania badań metodami sejsmiki inżynierskiej.

Słowa kluczowe: lokalny szum sejsmiczny, funkcja korelacji wzajemnej, parametry szumu sejsmicznego, pasywne metody sejsmiczne

## **Characterisation of seismic noise created by working ventilator of a mine shaft**

Abstract: Seismic noise used as a source of seismic waves in the identification of the wavefield in near-surface geology is increasingly common. In urbanised sites, using large active sources such as weight-drop in geophysical survey might be limited. Therefore, seismic noise could be an alternative. Performing a precise seismic wavefield analysis before its recognition is mandatory.

An example of seismic noise characteristic recorded near a working ventilator in a ventilation shaft of coal mine was provided. Major seismic noise parameters such as mean maximum amplitude values of velocity and acceleration, dominant frequency, frequency range of the main signal energy, range of influence and directionality are

---

\* Mgr inż., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, Kraków;  
e-mail: laszczak@min-pan.krakow.pl, czarny@min-pan.krakow.pl.

set. The obtained results and seismic noise directionality analysis, in particular, could minimise mistakes related to the estimation of seismic velocities and help in designing seismic engineering surveys.

Keywords: ambient seismic noise, cross-correlation function, seismic noise parameters, passive seismic methods

## **Wprowadzenie**

W metodach sejsmicznych wykorzystywanych do celów inżynierskich coraz częściej jako źródło stosuje się szum sejsmiczny (Pilecki i in. 2014). Szum sejsmiczny to zarejestrowany sygnał będący efektem wielokrotnego rozpraszania fal, który można opisać jako oscylacje niezdefiniowane w fazie i czasie (Marczak i in. 2014).

Ze względu na genezę szum sejsmiczny dzieli się na globalny i lokalny. Szum globalny, zwany też regionalnym, wywołany jest przede wszystkim przez procesy naturalne takie jak: trzęsienia ziemi, działalność wulkaniczna, falowanie mórz i oceanów czy gwałtownych przepływów mas powietrza (McNamara i Buland 2004). Szum lokalny, zwany także kulturowym, ma charakter antropogeniczny i związany jest m.in. z pracą fabryk i tranzytem (Aki i Richards 2002). Zakres częstotliwości szumu sejsmicznego regionalnego wynosi od 0,05 do 3 Hz, a w przypadku szumu lokalnego nawet do 30 Hz (Asten 1984; Pilecki i Isakow 2014).

Nieregularność lokalnego szumu sejsmicznego w przestrzeni i czasie rzutuje na jakość otrzymanych za jego pomocą wyników estymacji pola prędkości metodami sejsmiki inżynierskiej, dlatego ważne jest jego dokładne scharakteryzowanie.

Celem pracy jest przedstawienie przykładu charakterystyki szumu sejsmicznego w pobliżu pracującego wentylatora w sąsiedztwie szybu wentylacyjnego KWK Piekary.

### **1. Charakterystyka szumu sejsmicznego**

Ze względu na dominujący udział fal powierzchniowych w szumie sejsmicznym rozprzestrzeniającym się w utworach przypowierzchniowych, większość współcześnie stosowanych metod sejsmicznych wykorzystujących szum sejsmiczny jako źródło fal pozwala na rozpoznania pola prędkości fali poprzecznej. Do najczęściej stosowanych należą: wielokanałowa analiza fal powierzchniowych MASW (ang. *Multichannel Analysis of Seismic Waves*), ReMi (ang. *Refraction Microtremor*), HVSR (ang. *Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio*), SPAC (ang. *Spatial Autocorrelation*) oraz interferometria sejsmiczna IS (ang. *Seismic Interferometry*).

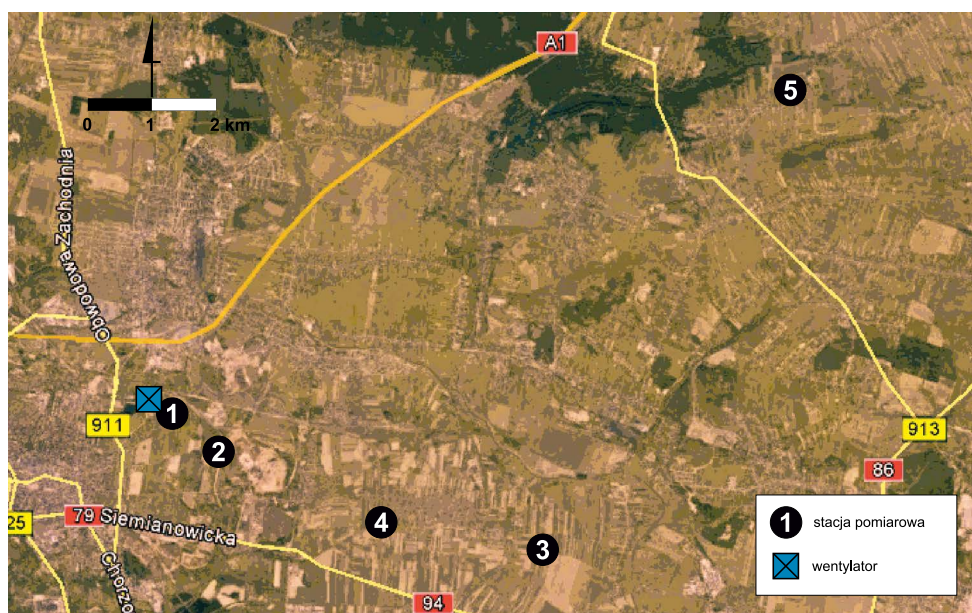
Adaptacja szumu sejsmicznego w metodach sejsmiki inżynierskiej opiera się na właściwościach dyfuzyjnego pola falowego (Lobkis i Weaver 2001), przy założeniach, że charakteryzuje się stacjonarnością w czasie oraz izotropowością ośrodka, tj. amplitudy szumu sejsmicznego mają identyczne wartości w każdym punkcie ośrodka (Wapenaar, Fokkema 2006). Zachowanie tak idealnych warunków w przypadku szumu sejsmicznego oraz ośrodka geologicznego jest prawie niemożliwe, dlatego stosuje się szereg procedur, aby te ograniczenia zminimalizować. Stacjonarność szumu sejsmicznego uzyskuje się najczęściej wydłużając czas rejestracji (Wapenaar i in. 2010), natomiast do poprawy błędów związanych z kierunkowością szumu sejsmicznego można stosować metodę cosinusów (Ruigrok i Wapenaar 2013), metodę przestrzennej autokorelacji (Asten 2006) albo metodę azymutów (Le Feuvre

2015). Opis parametrów szumu sejsmicznego takich jak: średnie maksymalne amplitudy prędkości i przyspieszenia, częstotliwość dominująca, zakres częstotliwości głównej energii sygnału oraz zasięg oddziaływania również stanowią cenną informację przy projektowaniu układu pomiarowego metod sejsmiki inżynierskiej.

## 2. Przykład charakterystyki szumu sejsmicznego

### 2.1. Lokalizacja badań

Badania lokalnego szumu sejsmicznego przeprowadzono w dwóch seriach pomiarowych w rejonie szybu wentylacyjnego Barbara KWK Piekary znajdującego się przy ul. Kędzierzyńskiej w Bytomiu (rys. 1). Pierwsza seria obejmowała pomiar w bezpośrednim otoczeniu szybu (rys. 1, punkt 1), natomiast druga odbyła się w punktach oddalonych od szybu o 1,3 km, 4,8 km, 6,2 km oraz 11,3 km (rys. 1, punkty od 2 do 5).



Rys. 1. Lokalizacja punktów pomiarowych i wentylatora (maps.google.pl)

Fig. 1. Location of measurement points and ventilator (maps.google.pl)

### 2.2. Warunki pomiarowe

Badania zostały wykonane na terenie Niecki Bytomskiej. Ma ona postać synkliny w kształcie wygiętego łuku o kierunku niemalże równoleżnikowym. Jest ona położona w zachodniej części północnego obniżenia brzeżnego GZW.

Obszar ten jest częścią Wyżyny Śląskiej i charakteryzowany jest jako słabo urozmaicony, monotony, lekko pofałdowany. Morfologia terenu jest efektem działalności silnej erozji trzeciorzędowej i wietrzenia krasowego oraz następującej po niej aktywności lodowca plejstoceńskiego. Dzisiejsza rzeźba terenu okolic Bytomia jest także rezultatem wpływów podziemnej eksploatacji górniczej. Powstały deformacje ciągłe i nieciągłe w postaci różnego rodzaju zapadisk, zrębów, lejów itp. ogólnie określanymi jako szkody górnicze (Pszonka 2007).

W rejonie Niecki Bytomskiej objętej płytką eksploatacją rud występują utwory karbońskie, triasowe, fragmentarycznie utwory jurajskie w postaci płatów oraz czwartorzędowe.

Na podstawie badań geotechnicznych wykonanych w bezpośrednim otoczeniu szybu wentylacyjnego (Geopartner 2012), można wyróżnić 3 podstawowe warstwy geotechniczno-geologiczne. Są to utwory antropogeniczne, warstwy piasku oraz warstwy gliniaste. Wymienione warstwy są niejednorodne od strony litologicznej. Najpłycej zalegająca warstwa nasypów budowlanych jest najbardziej zróżnicowana litologicznie. Tworzona jest przez różnego rodzaju zużyte materiały budowlane, a także piasek, glinę, grunty próchnicze i tłuczeń. Warstwa utworów antropogenicznych ograniczona jest od dołu warstwą piasków i glin. Utwory gliniaste to stosunkowa jednolita warstwa, składająca się głównie z gliny zwięzłej.

### **2.3. Metodyka pomiarowa**

Pomiary wykonano za pomocą sejsmometrów Guralp CMG-6TD (rys. 3). Urządzenie waży 3 kg i posiada wymiary 15,4 cm na 24,2 cm. Charakteryzuje się czułością 2x1200 V/m/s oraz zapewnia stabilny pomiar w temperaturach od  $-10^{\circ}\text{C}$  do  $75^{\circ}\text{C}$ . Posiada wbudowany przetwornik AC oparty na procesorze TMS3200 o taktowaniu 144 MHz oraz paśmie przenoszenia drgań w zakresie częstotliwości od 0,03 Hz do 100 Hz. Dodatkowo obudowa sejsmometru wykonana jest z twardego anodyzowanego aluminium.

W pierwszej serii pomiarowej profil miał kształt okręgu o promieniu 27,5 m i składał się z 11 czujników (rys. 2). Rejestracja trwała 1 godzinę z krokiem próbkowania 10 ms.

Kolejna seria pomiarowa została wykonana w 4 punktach oddalonych od szybu (rys. 1, punkty 2–5), za każdym razem wykorzystując dwa czujniki i rejestrując szum sejsmiczny przez ok. 40 minut. Zestawienie informacji o pomiarach przedstawia tabela 1.

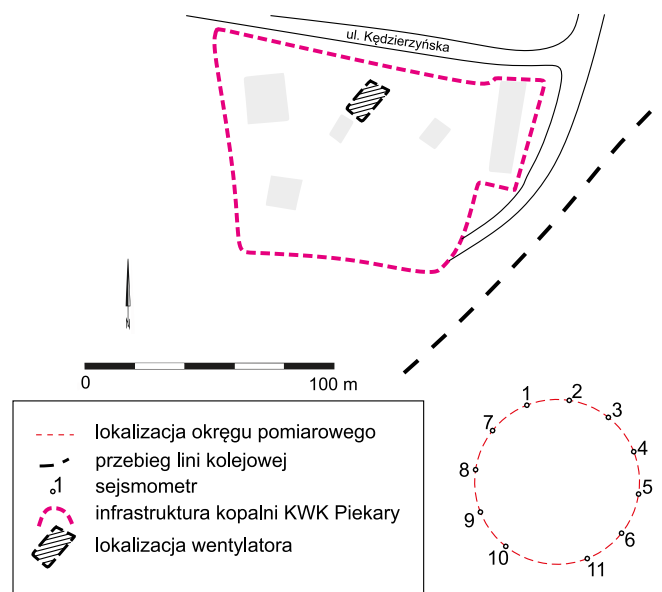
### **2.4. Metodyka przetwarzania i interpretacji danych**

Przetwarzanie danych polegało na uporządkowaniu danych sejsmicznych, korekty linii zerowej, kalibracji w jednostkach prędkości i przyspieszenia oraz filtracji danych filtrem górnoprzepustowym o wartości 0,5 Hz w celu eliminacji niskoczęstotliwościowej linii trendu.

Interpretację wykonano za pomocą programu Matlab w kilku etapach. W pierwszej kolejności obliczono widmo amplitudowe dla zapisów wszystkich składowych prędkości.

W celu obliczenia parametru tłumienia opisującego zasięg oddziaływania wentylatora dane zostały dodatkowo przefiltrowane trapezowym filtrem o częstotliwości 5,5/6–6,5/7 Hz. Następnie obliczone zostały wartości średnie maksymalnych amplitud prędkości, które posłużyły do sporządzenia wykresu tłumienia.

Kolejnym etapem było stworzenie diagramów, na podstawie których można stwierdzić kierunkowość szumu sejsmicznego. W tym celu dla danych pochodzących z okręgu pomiarowego



Rys. 2. Lokalizacja profilu pomiarowego w sąsiedztwie szybu

Fig. 2. Location of seismic profile near the ventilation shaft

TABELA 1. Zestawienie informacji dotyczących pomiarów szumu sejsmicznego

TABLE 1. Information concerning seismic noise acquisition

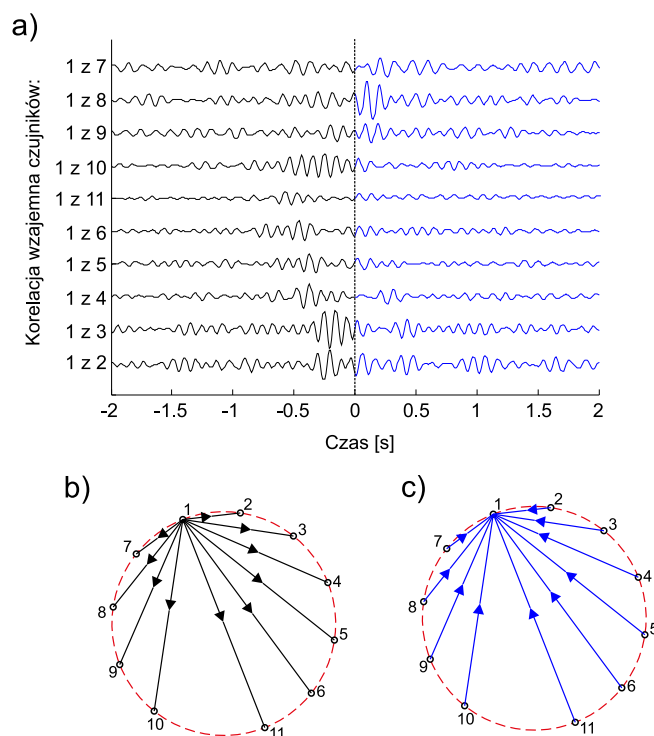
Seria badań	Punkty pomiarowe	Orientacyjna odległość od szybu [m]	Czas rejestracji [min]	Wykorzystana liczba czujników
I	1	150	60	11
II	2	1 300	40	2
II	3	4 300	40	2
II	4	6 800	40	2
II	5	11 300	40	2

została policzona korelacja wzajemna składowej pionowej dla wszystkich kombinacji par sejsmometrów (Bensen i in. 2007). Przykładem przetwarzania szumu sejsmicznego zarejestrowanego na sejsmometrze 1 z pozostałymi jest zbiór korelogramów (rys. 4a). Część ujemna odpowiada w tym przypadku szumowi sejsmicznemu przychodzącemu z północnego-zachodu na południowy-wschód (rys. 4b), część dodatnia z południowego-wschodu na północny-zachód (rys. 4c). W przypadku jednorodnie rozchodzącego się szumu sejsmicznego we wszystkich kierunkach, część dodatnia oraz część ujemna korelogramów powinna być identyczna (Snieder 2004), co jak widać na rysunku 4a nie zostało spełnione. Następnie dla wszystkich korelogramów obliczono średnie wartości amplitud dla części dodatniej oraz części ujemnej. Krokiem kończącym ten etap przetwarzania było obliczenie diagramów kierunkowych rozkładu amplitud dla części ujemnej oraz dla części dodatniej metodą tomografii z wykorzystaniem algorytmu SIRT (ang.



Rys. 3. Sejsmometr CMG-6TD firmy Güralp Systems Ltd ([www.guralp.com](http://www.guralp.com))

Fig. 3. CMG-6TD Seismometer, Güralp Systems Ltd ([www.guralp.com](http://www.guralp.com))



Rys. 4. Wynik korelacji wzajemnej prędkości drgań szumu sejsmicznego czujnika 1 z pozostałymi czujnikami a); kierunek korelacji wzajemnej części ujemnej b) i części dodatniej c)

Fig. 4. Cross correlation of seismic noise velocity oscillation result for sensor 1 with the rest a); direction of calculated correlation responding to b) casual side and c) acasual side

*Simultaneous Iterative Reconstruction Technique*). Parametrem wejściowym w tym przypadku była średnia wartość amplitudy pomiędzy poszczególnymi czujnikami, natomiast szukanym parametrem był rozkład tych amplitud wewnątrz okręgu.

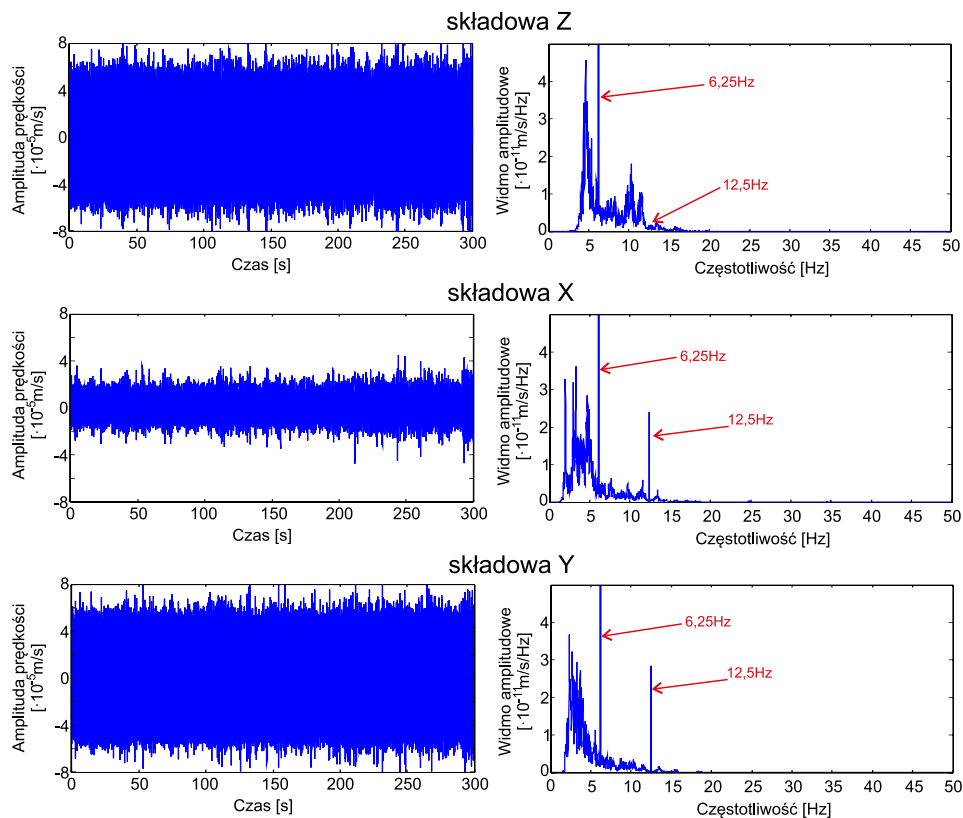
Dla danych pochodzących ze wszystkich punktów pomiarowych obliczono średnie wartości maksymalnych amplitud przyspieszenia i prędkości. Na podstawie obliczonych widm określono częstotliwości dominujące oraz zakres częstotliwości głównej energii sygnałów.

Kolejnym krokiem było wyznaczenie zasięgu wpływu wentylatora na podstawie sporządzonych wykresów tłumienia.

Ostatnim etapem było odczytanie dominującego kierunku propagacji szumu sejsmicznego poprzez analizę diagramów kierunkowych.

## 2.5. Wyniki i ich analiza

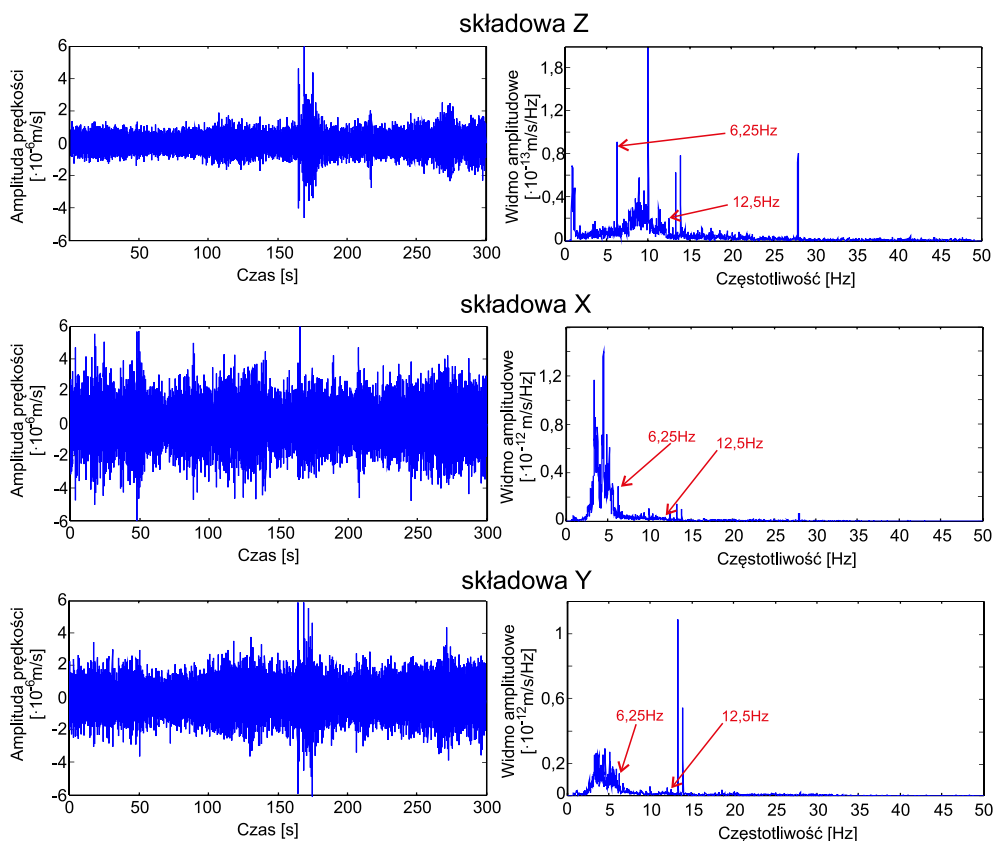
Przykład fragmentu zapisu trzech składowych prędkości drgań szumu sejsmicznego dla pierwszej i drugiej stacji pomiarowej oraz ich widma amplitudowe przedstawia rysunek 5



Rys. 5. Przykład zapisu 3 składowych amplitudy prędkości drgań szumu sejsmicznego oraz ich widma amplitudowe z zaznaczonymi pikami odpowiadającymi pracy wentylatora wyznaczone dla stacji pomiarowej 1

Fig. 5. Three component seismic noise registration and their amplitude spectrum for 1<sup>st</sup> station

i 6. Obliczone parametry szumu sejsmicznego dla wszystkich stacji pomiarowych zebrano w tabeli 2. Wykresy tłumienia ukazujące spadek średnich maksymalnych wartości składowej pionowej prędkości odpowiadających produktowej częstotliwości 6,25 Hz pracy wentylatora, wraz z odległością przedstawia rysunek 7.



Rys. 6. Przykład zapisu 3 składowych amplitudy prędkości drgań szumu sejsmicznego oraz ich widma amplitudowe z zaznaczonymi pikami odpowiadającymi pracy wentylatora wyznaczone dla stacji pomiarowej 2

Fig. 6. Three component seismic noise registration and their amplitude spectrum for 2<sup>nd</sup> station

Obecność wysokoenergetycznych pików 6,25 Hz a także 12,5 Hz na widmie amplitudowym wszystkich składowych na pierwszej stacji pomiarowej pozwala stwierdzić, iż są one związane z pracą wentylatora znajdującego się w szybie Barbara KWK Piekary. Na stacjach pomiarowych oddalonych od wentylatora o ponad 150 m pik ten posiada znacząco mniejszą energię. Na podstawie wykresów tłumienia średnich maksymalnych amplitud prędkości odpowiadających produktowej częstotliwości 6,25 Hz, wraz z odległością, możemy stwierdzić iż zakres oddziaływania pracującego wentylatora wynosi ok. 1700 m.

Analiza widm amplitudowych pozwala również wyciągnąć wniosek, iż większość lokalnego szumu sejsmicznego posiada główną energię w zakresie od 0,5 do ok. 15 Hz. Wielkość



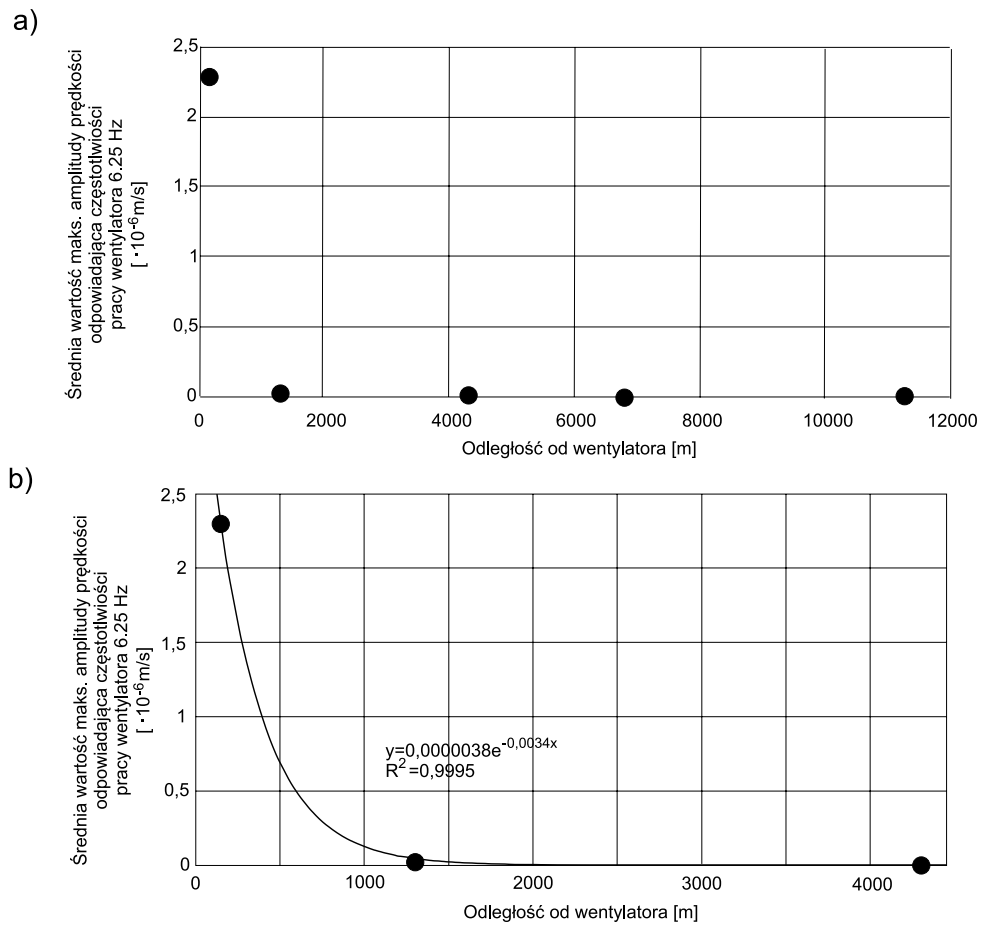
TABELA 2. Zestawienie parametrów szumu sejsmicznego

TABLE 2. Seismic noise parameters

Lp.	Nr stacji	Składowa	Śr. maks. amplituda prędkości [ $\cdot 10^{-6}$ m/s]	Śr. maks. amplituda przyspieszenia [ $\cdot 10^{-4}$ m/s <sup>2</sup> ]	Zakres częstotliwości głównej energii sygnału [Hz]	Częstotliwości dominujące [Hz]
1	1	Z	7,9875	5,53132	4–17	4,9; 6,25; 10
2	1	X	3,55094	2,65461	2–14	3,46; 4,8; 6,25; 12,5
3	1	Y	7,69089	4,80090	2–16	2,3; 2,5; 6,25; 12,5
4	2	Z	0,27913	3,18056	0,5–15	6,25; 10; 13,8; 27,8
5	2	X	0,46073	0,30933	1–8	3,9; 4,4
6	2	Y	0,36119	0,22762	1–7	4,7; 13,6; 13,8
7	3	Z	0,06361	2,27189	0,5–10; 32–46	1,2; 2,4; 3,3; 38,6
8	3	X	0,0782	0,29715	0,5–12; 36–49	1,2; 1,7; 3,3; 44,9
9	3	Y	0,09233	0,19629	0,5–12; 43–49	0,8; 1,2; 8,6
10	4	Z	0,05838	1,25128	0,5–10; 33–47	1,2; 2,9; 34,9
11	4	X	0,07425	1,29474	0,5–12; 35–49	1,2; 3,1; 35,19
12	4	Y	0,06562	0,15628	0,5–12; 42–49	0,8; 1,2; 5; 8,6
13	5	Z	0,03504	0,01941	0,5–15	2,7; 3,9;
14	5	X	0,05939	0,58776	0,5–15	0,91; 2,9; 5,3; 9,8
15	5	Y	0,05713	0,12815	0,5–15	2,7; 3,9; 5,3

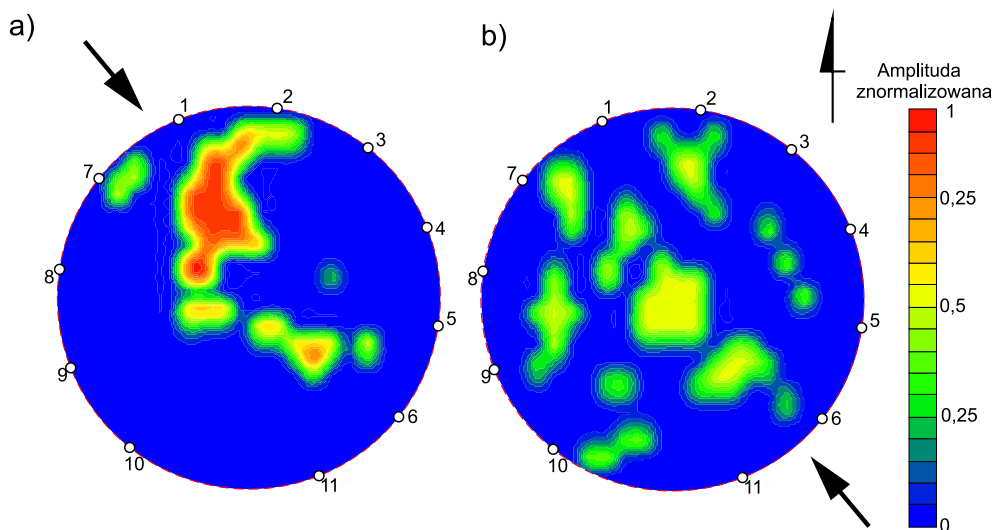
średnich maksymalnych amplitud prędkości i przyspieszenia znacząco maleje ze wzrostem odległości od wentylatora.

Diagramy kierunkowe szumu sejsmicznego estymowane dla części ujemnej (rys. 8a) oraz części dodatniej (rys. 8b) korelogramów wykazują większe średnie wartości amplitud w części ujemnej, co świadczy o dominującym kierunku źródła szumu z północnego-zachodu na południowy-wschód. Kierunek ten pokrywa się z lokalizacją wentylatora.



Rys. 7. Wykres zależności wartości średniej maksymalnej amplitudy składowej pionowej prędkości odpowiadającej częstotliwości pracy wentylatora 6.25 Hz od odległości dla punktów 1–5 (rys. 1) (a) oraz dla punktów 1–3 (rys. 1) (b)

Fig. 7. Attenuation of mean maximum amplitude of vertical component velocity values responding to the working ventilator frequency for points 1–5 (fig. 1) (a) and for points 1–3 (fig.1) (b)



Rys. 8. Diagramy średnich wartości amplitud znormalizowanych wraz z zaznaczonym kierunkiem propagacji szumu sejsmicznego: z północnego-zachodu na południowy-wschód a) oraz z południowego-wschodu na północny-zachód b)

Fig. 8. Diagrams of mean values of normalized amplitudes with marked direction of seismic noise propagation: from NW to SE a) and from SE to NW b)

### Podsumowanie

W pracy przedstawiono przykład charakterystyki lokalnego szumu sejsmicznego zarejestrowanego w pobliżu pracującego wentylatora szybu wentylacyjnego KWK Piekary. Wyznaczono główne jego parametry: średnie maksymalne amplitudy prędkości i przyspieszenia, częstotliwości dominujące, zakres częstotliwości głównej energii sygnału oraz zasięg oddziaływania dla tego szumu. Dodatkowo określono dominujący kierunek szumu sejsmicznego na podstawie diagramów obliczonych metodą korelacji wzajemnej oraz tomografii. Przeprowadzone badania i analiza wyników pozwoliły sformułować następujące wnioski:

- Sposób oceny kierunkowości szumu sejsmicznego przedstawiony w pracy potwierdza kierunek propagacji szumu sejsmicznego związany z jego źródłem – wentylatorem kopalnianym.
- Przedstawione parametry mogą być pomocne przy projektowaniu układów pomiarowych i doborze odpowiednich czujników dla metod sejsmiki inżynierskiej wykorzystującej szum sejsmiczny.
- Znajomość wyznaczonych parametrów może poprawić estymację pola prędkości fal poprzecznych wyznaczanych tymi metodami.

Artykuł został opracowany w wyniku realizacji projektu nr PBS1/A2/12/2013 o akronimie LOFRES uzyskanego w ramach I Konkursu Programu Badań Stosowanych dofinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

## Literatura

- Aki, K. i Richards, P. 2002. *Quantitative seismology*. Wyd. University Science Books.
- Asten, M. 2006. On bias and noise in passive seismic data from finite circular array data processed using SPAC methods. *Geophysics* 71(6), s. 153–162.
- Bensen i in. 2007 – Bensen, G., Ritzwoller, M., Barmin, M., Levshin, A., Lin, F., Moschetti, M. i Yang, Y. 2007. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements. *Geophysical Journal International* 169(3), s. 1239–1260.
- Geopartner 2012: Dokumentacja geofizyczna i geotechniczna w aspekcie szkód górniczych dla zadania: Budowa połączenia kolejowego MPL „Katowice” w Pyrzowicach z miastami aglomeracji górnośląskiej, odcinek Katowice – Pyrzowice.
- Le Feuvre, M., Joubert, A., Leparoux, D. i Côte, P. 2014. Passive Multi-channel Analysis of Surface Waves with Cross-correlations and Beamforming. Application to a Sea Dike. *Journal of Applied Geophysics* (114), s. 36–51.
- Lobkis, O. i Weaver, R. 2001. On the emergence of the Green’s function in the correlations of a diffuse field. *The Journal of the Acoustical Society of America* 110(6), s. 3011–3017.
- Marcak i in. 2014 – Marcak, H., Pilecki, Z. i Czarny, R. 2014. *Interferometria sejsmiczna w zagadnieniach górniczych*. Wyd. IGSMiE PAN.
- McNamara, D. i Buland, R. 2004. Ambient noise levels in the continental United States. *Bulletin of the Seismological Society of America* 94, 4, s. 1517–1527
- Nakamura, Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Railway Technical Research Institute, *Quarterly Reports* 30(1), s. 25–33.
- Peterson, J., Paulson, B. i McEvelly, T. 1985. Applications of Algebraic Reconstruction Techniques to Crosshole Seismic Data. *Geophysics* 50, s. 1566–1580.
- Pilecki, Z. i Isakow, Z. 2014. Projekt LOFRES – sejsmika pasywna LFS z wykorzystaniem szumu sejsmicznego. *Przegląd Górniczy* 7, s. 69–73.
- Pilecki i in. 2014 – Pilecki, Z., Harba, P., Czarny, R., Cielesta, S. i Pszonka, J. 2014. Źródła drgań w sejsmice inżynierskiej. *Przegląd Górniczy* 7, s. 22–31.
- Pszonka, J. 2007. Charakterystyka zagrożenia zapadliskowego w niecce bytomskiej na terenach historycznej eksploatacji rud metali w świetle warunków geologicznych. *Mat. Konf. XI Warsztaty Górnicze*, s. 117–136.
- Ruigrok, E. i Wapenaar, K. 2013. Receiver-pair seismic interferometry and the cosine method. *Mat. Konf. 75th EAGE Conference and Exhibition SPE EUROPEC 2013*, London, 10–13 June 2013.
- Snieder, R. 2004. Extracting the Green’s function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase. *Physical Review E* 69(4), 046610.
- Wapenaar i in. 2010 – Wapenaar, K., Slob, E., Snieder, R. i Curtis, A. 2010. Tutorial on seismic interferometry: Part 2 – Underlying theory and new advances. *Geophysics* vol. 75, s. 211–227.