

Charakterystyka i seismologiczne metody analizy aktywności sejsmicznej Górnośląskiego Zagłębia Węglowego

Characteristics and seismologic methods of analysis of seismic activity in the Upper Silesian Coal Basin



*Dr hab. inż. Krystyna Stec, prof. GIG**



*Dr hab. inż. Adam Lurka, prof. GIG**

Treść: Obserwacja aktywności sejsmicznej w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym prowadzona jest przez Główny Instytut Górnictwa od lat pięćdziesiątych ubiegłego stulecia. W artykule przedstawiono rys historyczny rozwoju sieci seismologicznej oraz charakterystykę sejsmiczności zaistniałej w latach 1993÷2012 w oparciu o bank danych o wstrząsach prowadzony w Laboratorium Geofizyki Górniczej w Zakładzie Geologii i Geofizyki. Przedstawiono również opracowane przez zespół specjalistów GIG nowe rozwiązania aparaturowe oraz aktualne sposoby interpretacji wstrząsów górotworu, które prowadzą do znacznie lepszej oceny potencjalnego zagrożenia sejsmicznego. Należą do nich w szczególności analizy sekwencyjne (zmiany w czasie) parametrów źródła i współczynnika b , określenie parametrów mechanizmów ognisk wstrząsów, badanie zmian pola prędkości wyznaczonego metodą tomografii pasywnej oraz wyznaczanie maksymalnych prędkości drgań PPV. Wyniki przeprowadzonych analiz zachowania się wybranych parametrów sejsmiczności, pozwalają na sformułowanie tezy, że istnieją prekursorzy wzrostu zagrożenia sejsmicznego, co pozwala z kolei na optymalne zastosowanie optymalnej profilaktyki przeciwtąpniowej.

Abstract: Observations of seismic activity in the Upper Silesian Coal Basin are led by the Central Mining Institute since 1950s of the last century. This paper presents a historical outline of seismologic network development and the characteristics of seismicity between 1993 and 2012, on the basis of data bank for tremors kept in the Laboratory of Mining Geophysics of the Geology and Geophysics Plant. The paper also presents new technical solutions as well as current methods of interpretation of rock mass tremors which enable higher assessment of the potential of seismic hazard. The above-mentioned was developed by experts from CMI. The new developments mainly include sequential analyses (changes over time) of source parameters and b coefficient, determination of the parameters of tremor focus mechanism, research on the changes of velocity field indicated by passive tomography as well as the indication of maximum vibration velocity. The results of the analyses of the behaviour of the selected seismicity parameters allow to state that there are precursors of seismic activity hazard which, in turn, enables an optimal application of anti-tremor prevention.

Słowa kluczowe:

wstrząsy górotworu, parametry źródła, współczynnik b , mechanizm ogniska, tomografia pasywna

Key words:

rock mass tremor, source parameters, b coefficient, focus mechanism, passive tomography

1. Wprowadzenie

Obserwacja aktywności sejsmicznej w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym prowadzona jest przez Główny Instytut Górnictwa od lat pięćdziesiątych ubiegłego stulecia. W artykule przedstawiono rys historyczny rozwoju sieci seismologicznej oraz charakterystykę sejsmiczności zaistniałej w latach 1993÷2012 w oparciu o bank danych o wstrząsach prowadzony w Laboratorium Geofizyki Górniczej w Zakładzie Geologii i Geofizyki. Przedstawiono również opracowane przez zespół

specjalistów GIG nowe rozwiązania aparaturowe oraz aktualne sposoby interpretacji wstrząsów górotworu, które prowadzą do znacznie lepszej oceny potencjalnego zagrożenia sejsmicznego. Należą do nich w szczególności analizy sekwencyjne (zmiany w czasie) parametrów źródła i współczynnika b , określenie parametrów mechanizmów ognisk wstrząsów, badanie zmian pola prędkości wyznaczonego metodą tomografii pasywnej oraz wyznaczenie maksymalnych prędkości drgań PPV. Wyniki przeprowadzonych analiz zachowania się wybranych parametrów sejsmiczności, pozwalają na sformułowanie tezy, że istnieją prekursorzy wzrostu zagrożenia sejsmicznego, co pozwala z kolei na optymalne zastosowanie optymalnej profilaktyki przeciwtąpniowej.

*1) Główny Instytut Górnictwa w Katowicach

2. Rys historyczny rozwoju górnośląskiej regionalnej sieci sejsmologicznej

Prowadzona od ponad 200 lat eksploatacja górnictwa w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym (GZW) ze względu na uwarunkowania budowy geologiczno-litologicznej skutkuje występowaniem aktywności sejsmicznej. Najstarsze informacje o katastrofach górniczych spowodowanych zjawiskami sejsmicznymi na Górnym Śląsku można znaleźć w literaturze niemieckiej z początków wieku XX [18], natomiast pierwsza stacja sejsmiczna została założona w roku 1929 w Raciborzu. Zadaniem tej stacji oraz kolejnych stacji filialnych działających w latach 1929–1944 w Bytomiu, Pyskowicach i Zabrze była obserwacja sejsmiczności rejonów górniczych Górnego Śląska w odniesieniu do groźnych wypadków górniczych w kopalniach mających miejsce w tamtym okresie. Przerwa w obserwacji sejsmologicznej nastąpiła w okresie II wojny światowej, a ich wznowienie nastąpiło w roku 1947, kiedy to uruchomiono ponownie stację w Raciborzu. W latach 1948–1950 dzięki staraniom Głównego Instytutu Górnictwa nastąpiła odbudowa stacji w Bytomiu i w Zabrze. Stacje te wyposażone były w sejsmografy mechaniczne typu Mainka z rejestracją piórkiem na zaczernionym papierze. Rejestracja zjawisk sejsmicznych, oparta na tego typu sejsmografach, nie pozwalała na uzyskanie odpowiedniej dokładności w lokalizacji ich ognisk. Warto przypomnieć, że do końca lat 50. XX w. specjaliści nie byli pewni, czy największe katastrofy górnicze – tąpnięcia są związane z naturalnymi trzęsieniami Ziemi czy bezpośrednio z wstrząsami pochodzącymi od bieżącej eksploatacji górniczej. Dopiero systematyczne badania podjęte w Głównym Instytucie Górnictwa (GIG) po uruchomieniu kolejnych 4 stacji z aparaturą o wyższym standardzie technicznym (miernikami drgań były sejsmografy elektrodynamiczne SK-58 i SU-59 z rejestracją optyczno-galwanometryczną) w latach 60. pozwoliły na udokumentowanie, że sejsmiczność w obszarze Górnego Śląska jest ściśle związana z prowadzoną eksploatacją, a ogniska wstrząsów występują w otoczeniu prowadzonej eksploatacji a nie kilka kilometrów głębiej [19]. W konsekwencji tych obserwacji ukierunkowano dalszy rozwój sieci sejsmologicznej na uzyskiwanie danych umożliwiających określenie w kopalniach lokalnego stanu zagrożenia sejsmicznego. W 1965 uruchomiono 3 stacje w obrębie kopalni „Miechowice” i stworzono system regionalno-kopalniany dający początek rozwojowi kopalnianych stacji sejsmologicznych. W latach 70. miało miejsce systematyczne i bardzo szybkie zwiększanie się liczby stacji kopalnianych, maksymalnie do 43 w latach 80. Stacje te były zakładane we wszystkich kopalniach, w których występowało zagrożenie sejsmiczne. Równoległe z rozwojem sieci kopalnianych modernizowana była sieć regionalna, dla której przełomem był rok 1974, kiedy to założono Górnośląską Regionalną Sieć Sejsmologiczną (GRSS) wyposażoną w analogową aparaturę sejsmologiczną Racal Thermionic z rejestracją na taśmach magnetycznych [20]. Wszystkie stacje sieci regionalnej znajdujące się w kilku miejscach na obszarze GZW wyposażone były w elektromagnetyczne sejsmografy typu Willmore’a MK-2 i wzmacniaczo-modulatory. Sygnały odbierane przez sejsmometry przekazywane były drogą radiową do centralnej jednostki rejestrującej w GIG, gdzie prowadzona była ciągła rejestracja wstrząsów górotworu na magnetycznym rejestratorze (rys. 1).

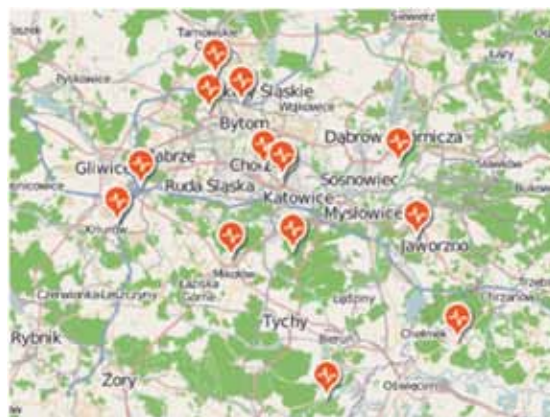
Pod koniec lat dziewięćdziesiątych analogowy system rejestracji Racal Thermionic został zastąpiony aparaturą sejsmologiczną AS produkcji GIG z rejestracją cyfrową, z progowym wyzwaniem wstrząsów, który w kolejnych latach zmodernizowano i nazwano systemem AS



Rys. 1. Centrum rejestracji Górnośląskiej Regionalnej Sieci Sejsmologicznej w latach 1975–1998

Fig. 1. Registration Center of the Upper Silesian Regional Seismologic Network between 1975 and 1998

1-SEJSGRAM. Modernizacja ta związana była z rozwojem techniki komputerowej wraz ze specjalistycznym oprogramowaniem [5]. W ciągu kolejnych lat, ze względu na otwieranie nowych pól eksploatacyjnych, dokonywano zmian w konfiguracji GRSS tak, aby wszystkie obszary charakteryzujące się występowaniem aktywności sejsmicznej objęte były monitoringiem aktywności sejsmicznej [12]. Od roku 2009 nastąpiła stopniowa wymiana stanowisk jedno-składowych rejestrujących amplitudy prędkości w kierunku Z na stanowiska trój-składowe (rejestracja amplitud prędkości w kierunkach XYZ) oraz zastąpienie radiowej transmisji danych łącznością modemową. Prace te realizowane były w ramach projektu aparaturowego finansowanego przez MNiSW (nr 401/E-263/S/2008-1) (Mutke i in. 2009). Aktualnie działająca GRSS składa się z 8 trój-składowych stanowisk aparatury SOS (System Obserwacji Sejsmologicznej produkcji GIG) rejestrujących prędkość drgań oraz 9 stanowisk szwajcarskiej aparatury GeoSig. W skład systemu GeoSig wchodzi 6 trój-składowych stanowisk rejestrujących prędkość drgań oraz 3 stanowiska rejestrujące przyspieszenia drgań. Sieć sejsmologiczna działa w systemie monitoringu ciągłego, polegającego na automatycznej detekcji wstrząsów. Sygnały sejsmiczne odbierane ze stanowisk sejsmometrycznych rozmieszczonych na obszarze GZW przesyłane są do centrum rejestrującego znajdującego się w GIG. Rozmieszczenie działających w 2012 r. stanowisk sejsmometrycznych na tle mapy topograficznej GZW przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Stanowiska sejsmiczne Górnośląskiej Regionalnej Sieci Sejsmologicznej w roku 2012

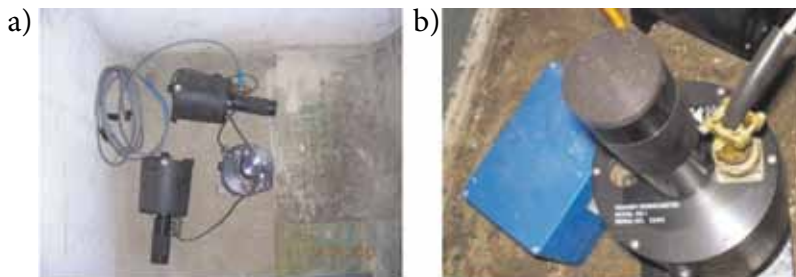
Fig. 2. Seismic positions of the Upper Silesian Regional Seismologic Network in 2012

Do akwizycji i analizy danych służy specjalistyczne oprogramowanie: w przypadku aparatury SOS program do rejestracji sejsmogramów – SEJSGRAM i program do analizy danych – MULTILOK a w przypadku aparatury GeoSig odpowiednio programy GEODAS-DAP i SEISAN.

Zdjęcia obrazują wygląd stanowisk sejsmometrycznych (rys. 3) i centrum rejestracji w GIG (rys. 4).

Bieżąca analiza każdego zarejestrowanego wstrząsu w oparciu o program SEJSGRAM i MULTILOK obejmuje kilka etapów. Przykład analizy sejsmogramu wysokoenergetycznego wstrząsu z dnia 20.10.2012, godz. 3¹² o energii $E = 2 \cdot 10^8$ J przedstawiono rys 5 i 6.

Z zarejestrowanego sejsmogramu wstrząsu (rys. 5) po filtracji zakłóceń w oparciu o współrzędne ogniska obliczono

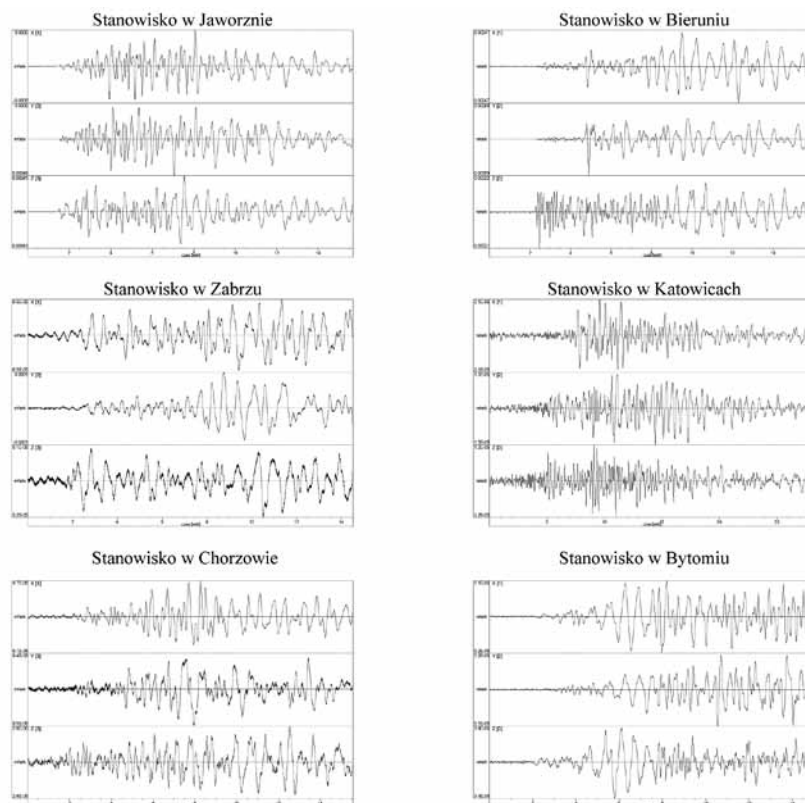


Rys. 3. Stanowiska sejsmiczne Górnośląskiej Regionalnej Sieci Sejsmologicznej a – Stanowisko pomiarowe SOS, b – Stanowisko pomiarowe aparatury GeoSig

Fig. 3. Seismic positions of the Upper Silesian Regional Seismologic Network

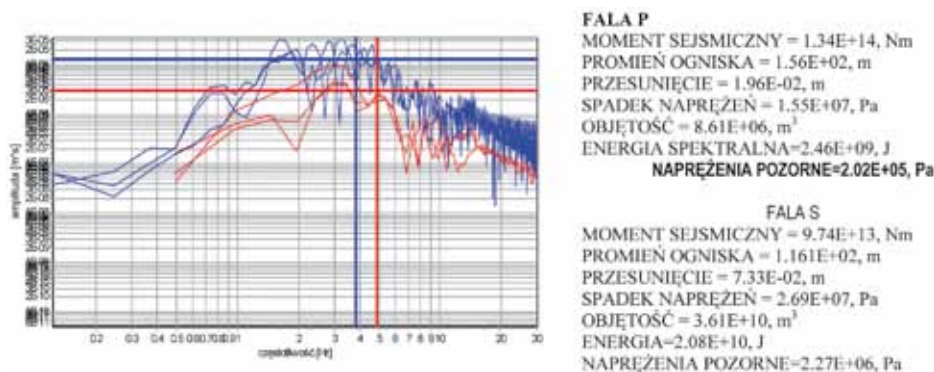


Rys. 4. Centrum rejestracji Górnośląskiej Regionalnej Sieci Sejsmologicznej
Fig. 4. Registration Center of the Upper Silesian Regional Seismologic Network



Rys. 5. Sejsmogramy wstrząsu z kopalni Piast z dnia 20.10.2012 r., godz. 3¹², energia $E = 2 \cdot 10^8$ J – aparatura SOS

Fig. 5. Seismograms of tremor from 20 October 2012, 3:12 o'clock, $E = 2 \times 10^8$ J – SOS apparatus



Rys. 6. Widmo przemieszczeniowe z zaznaczonym poziomem niskoczęstotliwościowym i częstotliwością narożną i parametry źródła wstrząsu z dnia 20.10.2012 r., godz. 3:12, $E = 2 \cdot 10^8$ J (fala P – kolor czerwony; fala S – kolor niebieski)

Fig. 6. Displacement spectrum with the low-frequency level and exposure frequency and the parameters of focus of the tremor from 20 October 2012, 3:12 o'clock, $E = 2 \times 10^8$ J (wave P – red; wave S – blue)

energię sejsmiczną. Obliczone zostały również parametry źródła (rys. 6). W pierwszej kolejności sejsmogram będący zapisami prędkości drgań gruntu został poddany funkcji całkowania celem otrzymania zapisów przemieszczeń gruntu. Następnie wybrane odcinki sejsmogramu przemieszczeń, odpowiadające grupom fal P i S, poddano szybkiej transformacji Fouriera. Z spektrum przemieszczeniowego fal P i S zostały obliczone parametry spektralne takie jak niskoczęstotliwościowy poziom spektralny Ω_0 i częstotliwość narożna f_0 , które posłużyły do obliczenia parametrów źródła i współczynników tłumienia.

Otrzymane wartości parametrów źródła analizowanego wstrząsu wskazują na tektoniczny charakter tego zjawiska, którego przyczyną może być dążenie do wyrównania naprężeń na lokalnych zaburzeniach tektonicznych. Częstotliwość narożna była niska i wynosiła 4,9 Hz (fala P) i 3,8 Hz (fala S). Dla fali P moment sejsmiczny wynosił $1,34 \cdot 10^{14}$ Nm, promień ogniska 156 m, przesunięcie w ognisku wynosiło $1,96 \cdot 10^{-2}$ m, spadek naprężeń, który oznacza różnicę między naprężeniem w ognisku przed wstrząsem i naprężeniem po wstrząsie był stosunkowo wysoki i wynosił odpowiednio $1,55 \cdot 10^7$ Pa.

W roku 2010, w ramach realizacji projektu MNiSW o nr. 401/E-263/S/2008-1, została uruchomiona strona internetowa www.grss.gig.eu, na której przedstawiane są wstrząsy

o energii od 10^6 J (magnituda od 2,2). Na stronie można wybrać zakres czasowy wyświetlania danych o wstrząsach, które opisane są następującymi parametrami: data i czas wystąpienia, współrzędne geograficzne, magnituda (rys. 7).

3. Aktywność sejsmiczna górnośląskiego zagłębia węglowego w latach 1993÷2012

Obserwacja aktywności sejsmicznej indukowanej działalnością górnictwem kopalń w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym prowadzona jest przez Główny Instytut Górnictwa od lat 50. ubiegłego stulecia, początkowo w oparciu o kilka pojedynczych stanowisk sejsmicznych, a od roku 1974 na podstawie rejestracji Górnośląskiej Regionalnej Sieci Sejsmologicznej GIG. Archiwalne dane wykazują, że w latach 1950÷1973 zarejestrowanych zostało około 350 zjawisk sejsmicznych o energii $E \geq 10^6$ J. Mimo niepełnego zbioru rejestrowanych wstrząsów, ze względu na niedoskonałość działającej wówczas sieci sejsmologicznej, o poziomie występującego zjawiska może jednak świadczyć liczba występujących wówczas tąpnięć i zawałów, których w tych latach było od kilkudziesięciu do nawet 400 rocznie. Modernizacja sieci, która nastąpiła w roku 1974 umożliwiła obniżenie dolnej granicy rejestracyjnej do energii $E \geq 10^5$ J oraz zwiększenie dokładności lokalizacji ognisk wstrząsów.

Od lat siedemdziesiątych opracowywany jest bank wstrząsów górotworu. Bank ten składa się z bazy cyfrowych sejsmogramów oraz z bazy parametrów sejsmologicznych. Parametry te obejmują datę i czas wystąpienia zjawiska, energię sejsmiczną, magnitudę, współrzędne epicentrum w układzie Suchej Góry, nazwę pokładu, wyrobiska i kopalni. Bank zawiera parametry sejsmologiczne ponad 56 000 silnych wstrząsów o energii $E \geq 10^5$ J. W latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych ubiegłego wieku w GZW poziomie aktywności sejsmicznej był bardzo wysoki. Występowało od 2000 do blisko 4000 wstrząsów górotworu rocznie, wśród których kilkadziesiąt zjawisk charakteryzowało się energią sejsmiczną $E \geq 10^7$ J. Natomiast w analizowanym okresie 1993÷2012, w porównaniu do lat poprzednich, wystąpił znaczny spadek liczby zjawisk sejsmicznych [11]. W tym dwudziestoletnim okresie wystąpiły 19 652 wstrząsy o energii $E \geq 10^5$ J, wśród nich 16 697 zjawisk o energii rzędu 10^5 J, a o energii 10^6 J – 2661 wstrząsów. Wystąpiło 268 wstrząsów o energii 10^7 J i 22 o energii 10^8 J. W okresie tym 4 wstrząsy miały energię rzędu 10^9 J (tabl. 1 i rys. 8a–f).



Rys. 7. Epicentrum wstrząsu z dnia 20. 10.2012 r., godz. 3¹² na tle mapy topograficznej (www.grss.gig.eu)

Fig. 7. Epicenter of the tremor from 20 October 2012, 3:12 o'clock, against the background of the topographic map (www.grss.gig.eu)

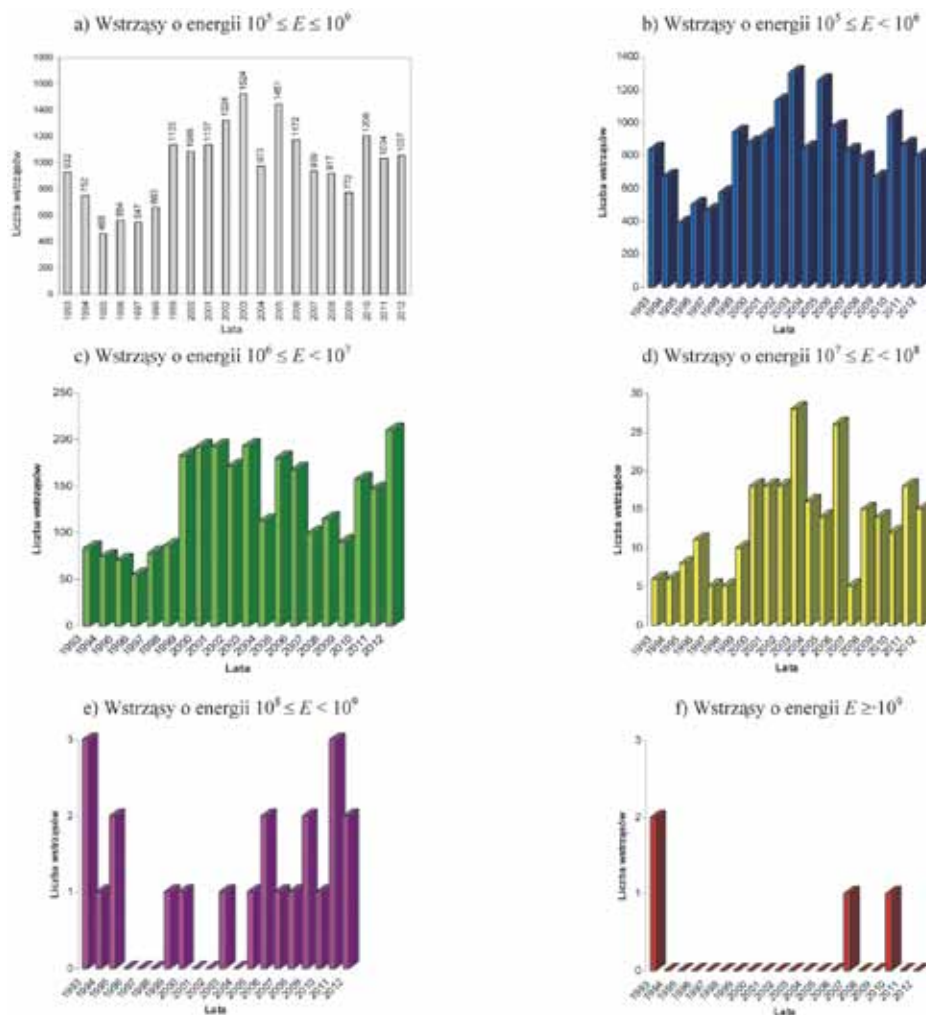
Tablica 1. Zestawienie energetyczno-ilościowe aktywności sejsmicznej w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym w latach 1993÷2012

Table 1. Quantity and energy of seismic activity in the Upper Silesian Coal Basin between 1993 and 2012

Lata	Liczba wstrząsów górotworu					
	105, J	106, J	107, J	108, J	109, J	Razem
1993	838	83	6	3	2	932
1994	671	74	6	1	0	752
1995	385	70	8	2	0	465
1996	499	54	11	0	0	564
1997	464	78	5	0	0	547
1998	572	86	5	0	0	663
1999	941	183	10	1	0	1135
2000	877	192	18	1	0	1088
2001	927	192	18	0	0	1137
2002	1135	171	18	0	0	1324
2003	1302	193	28	1	0	1524
2004	845	112	16	0	0	973
2005	1256	180	14	1	0	1451
2006	976	168	26	2	0	1172
2007	833	99	5	1	1	939
2008	786	115	15	1	0	917
2009	666	90	14	2	0	772
2010	1035	157	12	1	1	1206
2011	866	147	18	3	0	1034
2012	823	217	15	2	0	1057
Razem	16697	2661	268	22	4	19652

Z tablicy 1 i rysunku 8a wynika, że od początku lat 90. do roku 1997 liczba wstrząsów o energii powyżej 10^5 J wykazuje wyraźną tendencję zniżkową. W roku 1995 wystąpiło tylko 465 zjawisk, natomiast od roku 1998 widoczny jest wzrost ich liczby. W roku 2004 wystąpiło 1524 zjawisk czyli trzykrotnie więcej niż w połowie lat 90. jednak w kolejnym roku zaznaczył się wyraźny ich spadek – wystąpiły tylko 973 wstrząsy. Kolejny wzrost liczby wstrząsów miał miejsce w roku 2005 (1451 wstrząsów), ale w latach 2006÷2009 widoczna jest znów tendencja spadkowa. W roku 2010 wystąpiło około o 1/3 więcej zjawisk w stosunku do roku 2009. Natomiast w kolejnych latach 2011÷2012 wystąpił znów stopniowy ich spadek, głównie w klasie energetycznej rzędu 10^5 J (rys. 8b), co wpłynęło na zmniejszenie ogólnej liczby wstrząsów. Zauważa się, że w ostatnich latach wzrosła liczba wstrząsów o najwyższej energii. Średnia liczba wstrząsów o energii rzędu 10^7 J na przestrzeni 20 lat wynosiła 13 (rys. 8d). W latach 2003 i 2006 było 28 i 26 zjawisk tego rzędu. W całym 20-letnim okresie występowały jeden lub dwa wstrząsy o energii rzędu 10^8 J z wyjątkiem lat 1993 i 2011, kiedy miały miejsce trzy zjawiska o tej energii (rys. 8e). W roku 1993 wystąpiły dwa wstrząsy o energii rzędu 10^9 J, a w latach 2007 i 2010 po jednym wstrząsie (rys. 8f).

Ogniska wstrząsów nie występowały jednolicie na całym obszarze GZW ale w rejonach należących do różnych jednostek strukturalnych o głębokim zaleganiu pokładów węgla



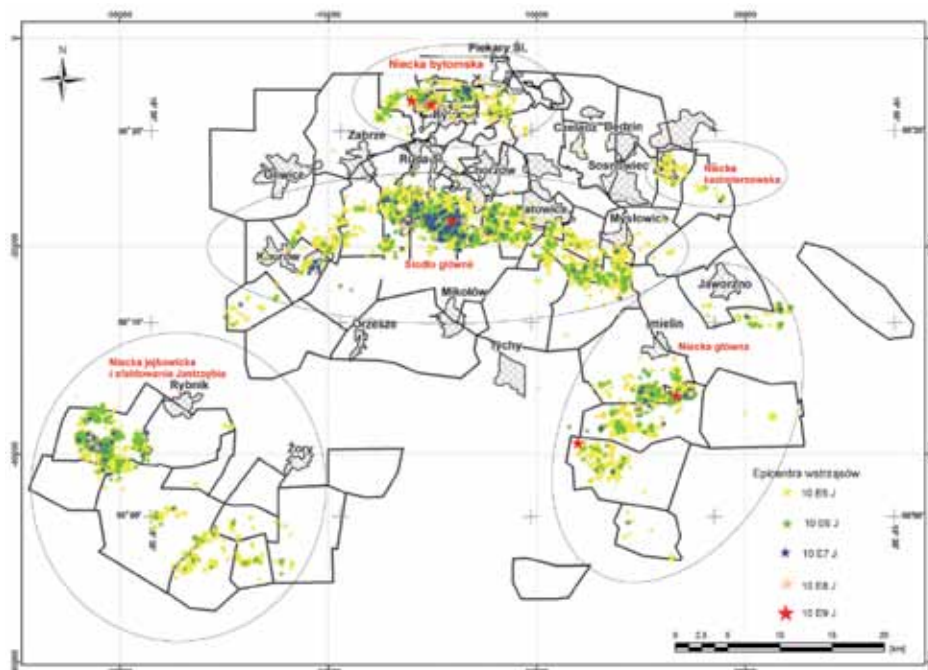
Rys. 8. Zestawienie wstrząsów górotworu w GZW w latach 2003÷2012

Fig. 8. Tremors of rock mass in the Upper Silesian Coal Basin between 2003 and 2012

otoczonych kompleksami piaskowcowymi o wysokich parametrach wytrzymałościowych oraz silnie rozwiniętą tektoniką. Jednostkami tymi są: niecka bytomska, siodło główne, niecka kazimierzowska, niecka główna, niecka jejkowicka. Epicentra wstrząsów na tle obszarów górniczych kopalń i zarysu miast przedstawione są na rysunku 9.

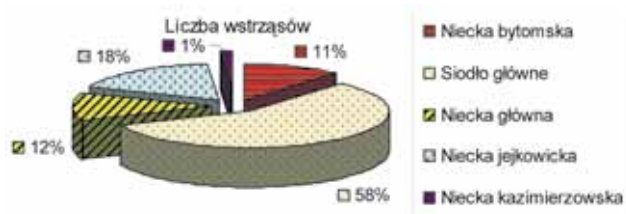
Dla wydzielonych rejonów zestawiono liczbę wstrząsów (rys. 10), energię sumaryczną (rys. 11) i energię średnią (rys. 12). Największa liczba wstrząsów wynosząca 58 % wystąpiła w siodle głównym. Energia sumaryczna wyzwolona przez te wstrząsy stanowiła 54 % a energia średnia 19 %. Niecka bytomska charakteryzowała się 11 % udziałem ilości wstrząsów, które wykazały 23 % energii sumarycznej. Wstrząsy te

charakteryzowały się najwyższą energią średnią wynoszącą ponad 42 %. W ogólnym zestawieniu oznacza to, że rejon niecki bytomskiej był rejonem o najwyższym zagrożeniu sejsmicznym, gdyż występujące wstrząsy miały zdecydowanie wyższą energię średnią niż w pozostałych rejonach. Duża ilość wstrząsów wystąpiła w okresie 1993–2012 w niecce jejkowickiej (18 %), ale o stosunkowo małej energii sumarycznej (12 %) i energii średniej (14 %). Niecka główna charakteryzowała się wysoką energią średnią stanowiącą 19 %, ale stosunkowo małą liczbą wstrząsów – 12 %. W rejonie niecki kazimierzowskiej ze względu na zmniejszenie wydobycia węgla (zamykanie kopalń) aktywność sejsmiczna była na bardzo niskim poziomie.



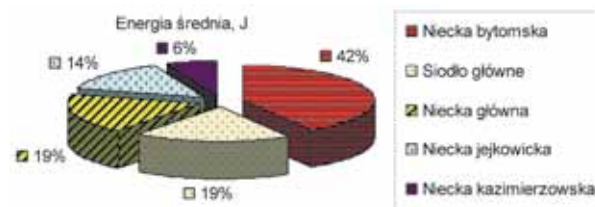
Rys. 9. Epicentra wstrząsów z lat 1993÷2012 na tle obszarów górniczych w GZW

Fig. 9. Epicenters of tremors from the period between 1993 and 2012 against the background of mining areas in the Upper Silesian Coal Basin



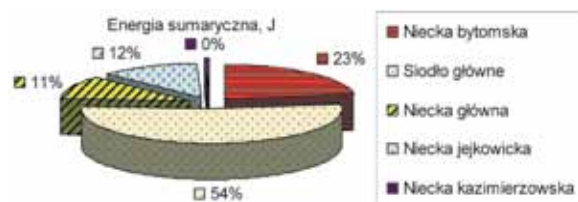
Rys. 10. Rozkład liczby wstrząsów górotworu w poszczególnych rejonach GZW w latach 1993÷2012

Fig. 10. Distribution of rock mass tremors in particular regions of the Upper Silesian Coal Basin between 1993 and 2012



Rys. 12. Rozkład energii średniej wstrząsów górotworu w poszczególnych rejonach GZW w latach 1993÷2012

Fig. 12. Distribution of median energy of rock mass tremors in particular regions of the Upper Silesian Coal Basin between 1993 and 2012



Rys. 11. Rozkład energii sumarycznej wstrząsów górotworu w poszczególnych rejonach GZW w latach 1993÷2012

Fig. 11. Distribution of total energy of rock mass tremors in particular regions of the Upper Silesian Coal Basin between 1993 and 2012

W celu pełniejszego opisu zmian aktywności sejsmicznej w GZW poniżej przedstawiono jej charakterystykę w odniesieniu do charakterystyki budowy geologicznej górotworu karbońskiego [14]. Najaktywniejszym sejsmicznie był rejon uskoku kłodnickiego w siodle głównym. Aktywność sejsmiczna tego rejonu związana była głównie z eksploatacją prowadzoną w warstwach siodłowych i rudzkich. Najwyższa energia sumaryczna i energia średnia wstrząsów oraz wstrząsy o najwyższej energii rzędu 10^8 i 10^9 J występowały podczas eksploatacji pokładów 502, 510 i 418. Najsilniejsze wstrząsy o energii powyżej 10^9 J występowały w osi niecki bytomskiej.

W niecce głównej aktywność sejsmiczna związana była z eksploatacją pokładów warstw łaziskich, w których najaktywniejszymi sejsmicznie były pokłady 207 i 209. Najsilniejszy wstrząs o energii $3 \cdot 10^9$ J wystąpił w kopalni „Piaś” w czasie eksploatacji w pokładzie 207. W niecce jejkowickiej powstanie największej liczby wstrząsów spowodowała eksploatacja w pokładach warstw jakłowickich, głównie pokładu 703 i 713. Analiza budowy litologicznej górotworu wykazała, że górotwór ze względu na charakterystykę warstw piaskowcowych ze względu na zdolność do indukowania wstrząsów sejsmicznych można podzielić na trzy typy. Górotwór typu I występuje w kopalniach eksploatujących obszar niecki bytomskiej oraz południowym skłonie siodła głównego. Charakteryzuje się naprzemianległymi ławicami piaskowców gruboziarnistych, średnioziarnistych i drobnoziarnistych, wśród których występują pokłady węgla oraz ilowce i mulowce. Aktywność sejsmiczna tego typu górotworu występowała podczas eksploatacji prowadzonej w warstwach siodłowych, rudzkich i porębskich. Jako potencjalne warstwy wstrząsogenne są to warstwy piaskowców o miąższościach od 10 do 30 m i wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie od 48 do 92 MPa. Górotwór typu II występuje w niecce głównej. Warstwy piaskowcowe w tym rejonie GZW charakteryzują się dużą miąższością w zakresie 30÷100 m, ale bardzo niską wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie w granicach 16÷30 MPa (średnio 20 MPa) jak dla tego typu utworów, co wskazuje, że utwory te nie są zdolne do wydzielania bardzo wysokoenergetycznych wstrząsów. Jednak wysokoenergetyczne wstrząsy o energii powyżej 10^6 J występowały głównie podczas eksploatacji warstw łaziskich. W tym rejonie pomimo występowania wysokoenergetycznych wstrząsów o energii rzędu 10^7 ÷ 10^9 J, zagrożenie tąpnięciami poszczególnych pokładów nie jest duże. Ogniska tych wstrząsów według analizy ekspertów ds. tępnięć położone są wysoko nad eksploatowanymi pokładami, głównie w pobliżu występujących struktur tektonicznych. Górotwór typu III określono dla eksploatacji prowadzonej w niecce jejkowickiej, gdzie zasadnicze znaczenie dla poziomu aktywności sejsmicznej ma obecność warstw piaskowcowych o dużej miąższości i wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (średnio 75 MPa), zalegających w dużych odległościach wynoszących od 200 do 300 m od prowadzonej eksploatacji. Sumowanie się wpływów wielopokładowej eksploatacji poniżej tych warstw powoduje ich załamywanie się i generowanie wysokoenergetycznych wstrząsów o energii rzędu 10^7 , 10^8 J. Zjawiska te nie powodują bezpośredniego zagrożenia eksploatowanych pokładów, ale mocno są odczuwane na powierzchni. Wyniki te są niezwykle przydatne dla prognozy aktywności sejsmicznej wykonywanej dla oceny zagrożenia sejsmicznego, związanego z projektowaniem przyszłej eksploatacji górniczej. Prognozę taką należy wykonywać w zależności od typu górotworu i okresu planowanej eksploatacji dwoma metodami. Dla górotworu typu I można stosować zależności empiryczne oparte na analizie warunków geologiczno-górnich i czaso-przestrzennym projekcie eksploatacji. W przypadku górotworu typu II i III na podstawie analizy danych z przeszłości, przy wykorzystaniu rozkładów probabilistycznych, można obliczyć statystyczne wskaźniki pozwalające na ocenę zagrożenia sejsmicznego w danym rejonie.

Archiwizowana w GIG baza parametrów sejsmologicznych, jak i sejsmogramów wstrząsów jest podstawą licznych badań w zakresie działalności statutowej GIG, projektów badawczych własnych, celowych i zamawianych oraz współpracy z jednostkami naukowymi krajowymi i zagranicznymi. Do podstawowych badań i analiz, które oparte są na sejsmogramach wstrząsów górniczych rejestrowanych przez GRSS, należy zaliczyć:

- uzyskanie danych do badań podstawowych nad przyczyną powstawania wstrząsów (badanie mechanizmu ognisk wstrząsów, określenie fizycznych parametrów ognisk wstrząsów, charakterystyka i przebieg radiacji sejsmicznej, wyznaczenie funkcji tłumienia, określenie modelu sejsmogeologicznego GZW),
- kontrola sejsmiczności w GZW (rola nadrzędna w stosunku do sieci kopalnianych),
- obserwacja sejsmiczności kopalń nieposiadających własnych sieci sejsmicznych,
- analiza danych w celu statystycznej prognozy sejsmiczności,
- doskonalenie sejsmologicznych kryteriów oceny stanu zagrożenia tąpnięciami,
- analiza ryzyka sejsmicznego dla infrastruktury powierzchniowej,
- badanie obciążeń dynamicznych na wyrobiska podziemne,
- monitorowanie zagrożenia sejsmicznego w obszarze Górnego Śląska,
- bezpieczne projektowanie zabudowy na terenach sejsmicznych,
- prowadzenie banku danych o sejsmiczności Górnego Śląska (kontynuacja bazy z lat poprzednich),
- edukacja młodzieży szkolnej w zakresie sejsmiczności indukowanej.

4. Metody analizy aktywności sejsmicznej

Rozwój metod interpretacyjnych w metodzie sejsmologii górniczej w ostatnim 20-leciu związany był z wprowadzeniem cyfrowej rejestracji zjawisk oraz powstaniem specjalistycznych programów interpretacyjnych. W tym okresie w GIG realizowane były rozwiązania projektowe, techniczne i metodyczne związane z opracowaniem i wdrożeniem do kopalń podziemnych nowoczesnych sieci sejsmologicznych. Opracowany i wyprodukowany System Obserwacji Sejsmologicznych – SOS działa w kilkunastu kopalniach. W systemie SOS do rejestracji wstrząsów stosowane są mobilne sondy DLM2001 zbudowane w oparciu o geofony jedno lub trójskładowe o obniżonej elektronicznie dolnej częstotliwości rejestracji wynoszącej 1 Hz oraz z wbudowanym układem nadajnika transmisji prądowej [5]. System SOS jest szczególnie przydatny w rejonach o skoncentrowanej eksploatacji, gdzie nie jest możliwe budowanie odpowiedniej liczby komór do zamontowania sejsmometrów SPI-70. Nowoczesna aparatura pomiarowa o odpowiedniej dynamice wraz z odpowiednim oprogramowaniem do analizy wstrząsów stworzyła możliwości wdrożenia nowych metod interpretacyjnych do standardowo prowadzonych analiz w kopalnianych sieciach sejsmologicznych. Metody m.in. takie jak obliczanie parametrów źródła, parametrów mechanizmu ognisk i tomografia pasywna miały na celu doskonalenie oceny stanu zagrożenia tąpnięciami, a przez to poprawę bezpieczeństwa w kopalniach. W latach 2009÷2011 na podstawie prowadzonych statutowych prac badawczych [10] zostały zweryfikowane stosowane od kilkunastu lat w kopalniach sejsmologiczne kryteria oceny stanu zagrożenia tąpnięciami, które zawarte zostały w załączniku nr 2 pt.: „Metoda sejsmologii górniczej oceny stanu zagrożenia sejsmicznego i tąpnięciami” do Instrukcji GIG nr 22 pt.: „Zasady stosowania metody kompleksowej i metod szczegółowych oceny stanu zagrożenia tąpnięciami w kopalniach węgla kamiennego”. Wymieniona Instrukcja stosowana jest już w kopalniach w oparciu o rejestracje prowadzone przez zmodernizowane przez te kopalnie stacje sejsmologiczne ze względu na występujące wysokie zagrożenie tąpnięciami.

4.1. Podstawowe parametry sejsmologiczne do oceny stanu zagrożenia sejsmicznego

Ocena zagrożenia sejsmicznego zgodnie z wymienioną powyżej Instrukcją (Barański in. 2012) opiera się na interpretacji sejsmogramów, w wyniku której otrzymuje się następujące parametry:

- współrzędne ogniska (X, Y, Z),
- energia sejsmiczna,
- parametry źródła (skalarny moment sejsmiczny, indeks energii),
- wydatek energii sejsmicznej na 5 m postępu ściany eksploatacyjnej,
- współczynnika b z relacji Gutenberga-Richtera w przesuwającym się oknie czasowym.

W aktualnie stosowanym oprogramowaniu do lokalizacji ognisk wstrząsów w oparciu o algorytmy optymalizacji (Simplex, Powella, Davidona-Fletcher-Powella) istnieje możliwość zastosowania kilku metod:

- metoda różnic czasów pierwszych wejść fali P lub innych fal sejsmicznych na różne stanowiska pomiarowe,
- metoda oparta na różnicy czasów przyścia na daną stację dwóch różnych rodzajów fal (najczęściej S-P),
- metoda azymutalna (kierunkowa),
- metoda analizy polaryzacji fal.

Energię sejsmiczną oblicza się z sejsmogramów w oparciu o numeryczne całkowanie po czasie kwadratu prędkości drgań z fal bezpośrednich (fala podłużna P i fala poprzeczna S). Zależność między energią sejsmiczną określonej grupy falowej a jej parametrami określonymi z sejsmogramu można zapisać w domenie czasu następująco [10]

$$E_s = K_{S,P} \int_{t_1}^{t_2} |v(t)|^2 dt \quad (1)$$

gdzie:

$K_{S,P}$ – funkcja prędkości propagacji fali S lub P; gęstości ośrodka, odległości rejestracji, własności tłumiących górotworu;

$v(t)$ – prędkość drgań cząstek górotworu, m/s;

t_1 i t_2 – odpowiednio czas początku i końca drgań dla grupy fal P i S.

Zagrożenie sejsmiczne w obszarze ściany eksploatacyjnej można określać w oparciu o badanie trendu zmian średniej wartości skalarnego momentu sejsmicznego M_0 w przesuwających się oknach czasowych. Skalarny moment sejsmiczny M_0 , wyznaczany jest niezależnie od energii sejsmicznej. Jest definiowany dla płaskiego zastępczego źródła jako [10]

$$M_0 = \mu \bar{u} A \quad (2)$$

gdzie:

M_0 – skalarny moment sejsmiczny, Nm;

μ – moduł sztywności postaciowej,

\bar{u} – średnie przemieszczenie na płaszczyźnie rozrywu,

A – kołowa powierzchnia rozrywu.

Skalarny moment sejsmiczny jest podstawowym parametrem niezbędnym do wyznaczania innych informatywnych parametrów źródła, takich jak spadek naprężeń, naprężenia pozorne oraz indeks energii. Obliczenia tego parametru wykonuje się w domenie częstotliwościowej, wyznaczając tzw. poziom niskoczęstotliwościowej części widma przemieszczenia w dalekim polu dla fal P i S. Związek skalarnego momentu sejsmicznego z widmem przemieszczenia w polu dalekim jest następujący

$$M_0 = \frac{4\pi\rho\beta^3\Omega_0 R}{F_s} \quad (3)$$

gdzie:

M_0 – skalarny moment sejsmiczny, Nm;

Ω_0 – wartość niskoczęstotliwościowej, stałej części w widmie przemieszczenia w polu dalekim, m·s;

R – odległość hipocentralna, m;

β – prędkość propagacji fali poprzecznej S, m/s;

ρ – gęstość objętościowa, kg/m³;

F_s – funkcja uwzględniająca kierunkowy charakter emisji fal objętościowych ze źródła.

Parametrem związanym z parametrami źródła, jest indeks energii, EI – wyraża stosunek energii sejsmicznej określonego wstrząsu do średniej energii uwalnianej w badanym obszarze przez wstrząsy o takich samych momentach sejsmicznych. Ponieważ wyzwalamy energia jest tym większa, im wyższe jest pole naprężeń (przy takim samym spadku naprężeń i niezmiennym momencie sejsmicznym), to EI oznacza, że ogniska wstrząsów o dużych wartościach tego parametru, tworzą się w strefie o wyższych naprężeniach wyjściowych (czyli w strefie podwyższonej skłonności górotworu do tworzenia się silnych wstrząsów). Parametr EI wyraża się [10]

$$EI = \frac{E}{\bar{E}(M_0)} \quad (4)$$

gdzie:

$\bar{E}(M_0) = 10^{c \log M_0 - d}$;

c, d – stałe dla danego obszaru;

M_0 – skalarny moment sejsmiczny.

Jeżeli $EI > 1$, to otrzymujemy informację, że naprężenia w obszarze ogniskowym są większe niż średnie dla analizowanego obszaru.

Rozkład Gutenberga-Richtera opisuje charakterystykę energetyczno-ilościową obserwowanych w danym rejonie wstrząsów, z których buduje się krzywe powtarzalności. Krzywe te wyrażają zależność między liczbą wstrząsów a ich magnitudą lub energią sejsmiczną, według wzoru podanego przez Gutenberga i Richtera:

$$\begin{aligned} \log N &= a - bM \\ \log N &= a - b \log E_s \end{aligned} \quad (6)$$

gdzie:

N – liczba wstrząsów o magnitudzie w danym przedziale ($M \pm \Delta M/2$);

E_s – energia sejsmiczna,

a, b – stałe.

Stała a zależy między innymi od maksymalnej magnitudy lub energii sejsmicznej w grupie badanych wstrząsów oraz od stałej b i charakteryzuje poziom sejsmiczności w danym rejonie. Współczynnik b tego rozkładu określa stosunek silnych do słabych zjawisk w badanym zbiorze. Niskie wartości współczynnika b informują, że w badanym zbiorze dominują wstrząsy silne. W ocenie zagrożenia sejsmicznego i tapaniami realne zagrożenie stanowią wstrząsy silne, których ogniska lokalizowane są blisko wyrobisk eksploatacyjnych. Badanie wartości współczynnika b w zbiorze wstrząsów z obszaru ściany eksploatacyjnej, pozwala ocenić przygotowanie górotworu do indukowania wstrząsów niebezpiecznych dla stateczności wyrobisk górniczych i bezpieczeństwa załogi. Współczynnik b może być wskaźnikiem stanu naprężeń, ponieważ współczynnik ten maleje, gdy rosną naprężenia. Do oceny zagrożenia można wykorzystać analizę trendu współczynnika b z relacji Gutenberga-Richtera, wyznaczonego w oknie czasowym o długości okna czasowego dobranej indywidualnie w poszczególnych kopalniach [10].

4.2. Metoda wyznaczenia maksymalnych amplitud prędkości drgań cząstek górotworu (PPV)

Jednym z podstawowych kryteriów stateczności podziemnych wyrobisk górniczych pod wpływem obciążeń dynamicz-

nych wywołanych wstrząsami górniczymi jest wartość pikowej amplitudy prędkości drgań cząstek górotworu (PPV) oddziałującej na te wyrobiska [6]. Obciążenia te można określić na podstawie pomiaru prędkości drgań cząsteczek górotworu PPV ze względu na to, że wartość PPV ma pośredni związek z dynamicznymi naprężeniami w masywie skalnym. W celu oszacowania zmian naprężeń wokół wyrobisk górniczych pod wpływem wstrząsów górotworu zostały wykonane pomiary PPV na kilku poligonach przy zastosowaniu specjalistycznych sond geofonowych. Obliczona dla tych samych wstrząsów wartość skalarnego momentu sejsmicznego M_0 , wyrażającego siłę wstrząsu, pozwoliły na uzyskanie empirycznej zależności między parametrami $PPV \cdot R$ i M_0 (Mutke 2007)

$$\log(PPV \cdot R) = 0,66 \cdot \log(M_0) - 7,4; \text{ dla } r_k^2 = 0,6 \quad (7)$$

gdzie:

- PPV – amplitudy prędkości drgań cząstek górotworu, m/s;
- M_0 – skalarny moment sejsmiczny, Nm;
- R – odległość od wstrząsu do stanowiska pomiarowego, m;
- r_k^2 – kwadrat współczynnika korelacji.

W oparciu o wzór (7) znając z bezpośrednich pomiarów wartość PPV można prognozować prędkość drgań PPV w polu falowym bliskim i pośrednim, w odległości do 500 m od ogniska wstrząsu. Ponieważ dla większości obszarów eksploatacyjnych popełniany jest statystyczny błąd lokalizacji wstrząsów przekraczający 30 m, stosowanie metody w praktyce przemysłowej wymaga innego, bardziej dokładnego, podejścia wyznaczania wartości ilościowej parametru PPV . W efekcie zaproponowano metodę bezpośredniego pomiaru parametru PPV w otoczeniu wyrobisk eksploatacyjnych. Wartości amplitud prędkości drgań PPV z sond pomiarowych, po skorygowaniu przez funkcję wagową, są wykreślane na bieżąco po każdym wstrząsie i porównywane z ustalonymi wartościami kryterialnymi PPV_w . Wartości kryterialne zważonego parametru PPV_w dla poszczególnych poziomów oceny potencjalnego zagrożenia stateczności wyrobiska, są następujące [7]:

- a – brak zagrożenia: $PPV_w \leq 0,05$ m/s,
- b – słabe zagrożenie: $0,05 < PPV_w \leq 0,2$ m/s,
- c – średnie zagrożenie: $0,2 < PPV_w \leq 0,4$ m/s,
- d – wysokie zagrożenie: $PPV_w > 0,4$ m/s.

W metodzie PPV bardzo istotny jest pomiar drgań. Miernikami drgań są sondy jednoskładowe typu DLMPPV oraz trójskładowe typu DLMPPV3D opisane szczegółowo w literaturze [8], które umożliwiają określenie parametrów prędkości drgań PPV do 1 m/s w zakresie częstotliwości 1–100

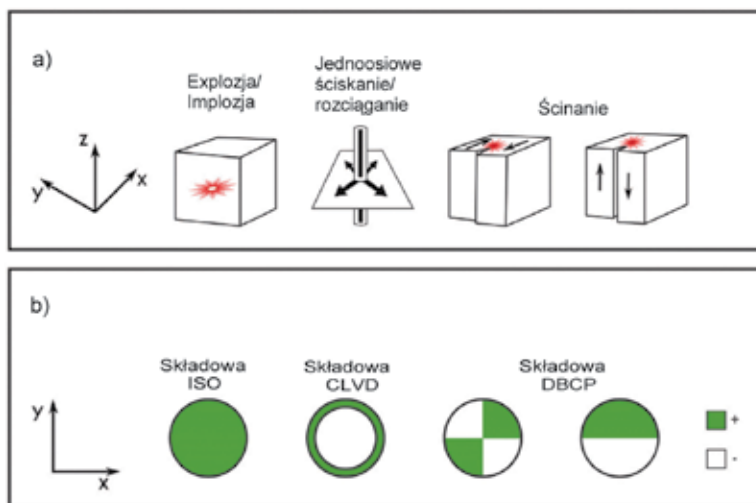
Hz, co zapewnia nieprzesterowany zapis wstrząsów górniczych o energiach sejsmicznych do 10^9 J, nawet w obszarze bliskiego pola falowego. Zastosowanie sondy typu DLMPPV oraz typu DLMPPV3D do monitorowania wstrząsów wpływa na dokładniejszą lokalizację zjawisk sejsmicznych na wybiegu ściany i w jej otoczeniu oraz na ciągłą obserwację i określanie rzeczywistych wartości pikowych amplitud prędkości drgań PPV na ociosach wyrobiska górniczego.

4.3. Mechanizm ognisk wstrząsów

Przeprowadzone na początku lat 90. XX w. badania dotyczące mechanizmu ognisk wstrząsów metodą inwersji tensora momentu sejsmicznego wykazały, że parametry charakteryzujące ognisko wstrząsu są wielkościami, które dobrze charakteryzują procesy geomechaniczne zachodzące w ognisku wstrząsu. Podstawy teoretyczne metody były przedmiotem wielu publikacji zagranicznych, jak i polskich. Tensor momentu sejsmicznego można rozłożyć na część izotropową (opisującą zmiany objętości w źródle) oraz część dewiatorową, która jest złożeniem podwójnej pary sił i skompensowanego liniowo dipola wektorowego. Dekompozycja ta jest najczęściej przyjmowanym opisem źródła sejsmicznego. Graficzny obraz modelu powstawania pęknięcia skał i odpowiadający model mechanizmu ogniska dla poszczególnych składowych tensora momentu sejsmicznego przedstawia rysunek 13. W przypadku dominacji składowej ścinania określa się orientację przestrzenną płaszczyzny ogniskowej, na której ma miejsce proces niszczenia, to jest jej azymut i upad oraz kierunek i zwrot przemieszczenia na tej płaszczyźnie. Uzyskuje się również dane o azymucie i zanurzeniu osi naprężeń kompresyjnych P i tensyjnych T.

W prowadzonych w GIG badaniach do obliczeń tensora momentu sejsmicznego wykorzystywane były specjalistyczne programy: do roku 2008 program SMT [17] a następnie od roku 2009 program Foci [3]. Programy te umożliwiły uzyskiwanie trzech modeli ogniska wstrząsu, opisanych przez trzy rodzaje tensora momentu sejsmicznego:

- tensor ogólny – składający się ze składowej izotropowej ISO, która opisuje zmiany objętości w ognisku (eksplozja $+/+$ lub implozja $-/-$), składowej CLVD odpowiadającej jednoosiowemu ściskaniu $-/-$ lub rozciąganiu $+/+$ oraz składowej ścinającej DBCP opisywanej przez podwójną parę sił,
- tensor dewiatoryczny, związany ze zmianą postaci bez zmiany objętości, ma dwie składowe, tj. CLVD i DBCP,
- tensor czystego ścinania ma tylko składową DBCP.



Rys. 13. Korelacja między modelem powstawania pęknięcia w ośrodku skalnym – a) a projekcją stereograficzną rozchodzenia się fal sejsmicznych na półkuli ogniskowej – b)

Fig. 13. Correlation between the model of cracking in the rock mass (a) and the stereographic projection of seismic waves propagation in the focal hemisphere (b)

Wyniki badań mechanizmu ognisk dużego zbioru wstrząsów o różnej energii sejsmicznej (kilkaset wstrząsów), ogólnie scharakteryzowanych w dalszej treści rozdziału, można odnieść do dwóch obszarów badawczych oddziaływanie wstrząsów górniczych:

- na wyrobiska podziemne,
- na powierzchniową infrastrukturę budowlaną.

Pierwszy obszar obejmuje wykorzystanie parametrów mechanizmu ognisk do określenia typów zjawisk sejsmicznych w celu ustalenia genezy tych zjawisk, a także do oceny stanu zagrożenia sejsmicznego i powiązanego z nim zagrożenia tąpnięciami. Można podzielić go na cztery grupy tematyczne:

- udowodnienie istnienia zjawiska modalności sejsmiczności górniczej – wydzielenie różniących się typów genetycznych wstrząsów sejsmicznych,
- określenie przyczyn i genezy zaistniałych tąpnięć,
- badanie lokalnego pola naprężeń,
- charakterystyka dynamicznego oddziaływania wstrząsów górniczych na wyrobiska podziemne.

Drugi obszar badawczy dotyczy określenia, jak mechanizm ogniska wstrząsu górniczego, determinujący kierunkowość radiacji sejsmicznej, może wpływać na rozkład intensywności drgań mających wpływ na powierzchniową infrastrukturę budowlaną.

Występowanie wstrząsów górniczych zależy od wielu czynników geologiczno-górniczych (budowa tektoniczna rejonu, położenie frontu ścianowego, istniejące zaszczości eksploatacyjne), których wzajemna korelacja ma decydujący wpływ na powstawanie wstrząsów o różnym mechanizmie ognisk [13, 15]. Wstrząsy sejsmiczne podzielono ogólnie na trzy grupy: „stropowe”, „pokładowe” i „regionalne”. Określenie przyczyn występowania danego typu wstrząsów ma podstawowe znaczenie dla oceny zagrożenia sejsmicznego w danym rejonie, ponieważ poznanie procesów pęknięcia w źródle jest niezbędne do opracowywania technik prognozowania, zwalczania i przeciwdziałania zjawiskom dynamicznym. Wstrząsy tzw. „pokładowe” o mechanizmie eksplozywnym wymagają innej profilaktyki niż wstrząsy „stropowe”, w których dominują siły ścinania, a ogniska lokalizują się poza pokładem. Wykazano również, że wysokoenergetyczne wstrząsy (energia sejsmiczna 10^8 – 10^9 J) o charakterze regionalnym, zależą od występowania naprężeń rezydualnych w głębokich strukturach GZW i z reguły nie wpływają na wzrost zagrożenia w bezpośrednim sąsiedztwie wyrobisk górniczych. W przypadku analizy wstrząsów powodujących tąpnięcia stwierdzono, że opracowanie mechanizmów ognisk wstrząsów poprzedzających tąpnięcie (*foreshocks*) oraz wstrząsu, który go wywołał, pozwala na bardziej obiektywną ocenę przebiegu zdarzeń, które doprowadziły do wystąpienia tąpnięcia w danym rejonie. Tego typu informacje są również bardzo przydatne dla prawidłowej interpretacji wyników dotyczących określenia przyczyn zaistniałych tąpnięć oraz podejmowania decyzji o ponownym wznowieniu eksploatacji górniczej, która powinna zachować wszelkie warunki bezpieczeństwa.

Na podstawie parametrów mechanizmu ognisk wstrząsów można określić względne wartości naprężeń [16]. Metoda ta jest szczególnie cenna ze względu na informację użyteczną dla celów prognostycznych i oceny zagrożenia sejsmicznego w kopalniach, gdzie eksploatacji towarzyszy wyraźna sejsmiczność górotworu. Na podstawie parametrów opisujących stan naprężeń w danym rejonie można określić skłonność górotworu do generowania wstrząsów, ponieważ większe wartości naprężenia ścinającego charakteryzują górotwór o wyższej wytrzymałości. Aktualnie ani na nauka ani praktyka nie dysponuje innymi technikami bezpośredniej i równie szybkiej oceny parametrów pola naprężeń, a szczególnie obserwacji jego zmian w czasie wybierania aktywnej sejsmicznie partii górotworu.

Metoda analizy numerycznej wykorzystująca przestrzenne położenie płaszczyzny pęknięcia w ognisku przy szacowaniu obciążeń dynamicznych na wyrobiska górnicze, pozwala na zrozumienie różnic występujących w dynamice drgań w różnych fragmentach górotworu. Wyniki tych badań mogą przyczynić się do pełniejszego wykorzystania metody sejsmologicznej w ocenie zagrożenia tąpnięciami, ze względu na uzyskanie dodatkowej informacji, przydatnej dla określenia stateczności wyrobiska górniczego poddanego dynamicznym oddziaływaniom przez wstrząsy górotworu.

Badania wpływu parametrów mechanizmu ognisk wstrząsów determinujących charakterystykę kierunkową radiacji sejsmicznej, które polegały na korelacji rozkładu radiacji wyznaczonej w oparciu o parametry płaszczyzny pęknięcia w ognisku z rozkładem amplitud przyspieszeń drgań gruntu na powierzchni (zredukowanych o współczynnik amplifikacji drgań) określonym z rejestracji na sejsmometrycznych stanowiskach powierzchniowych wykazały, że ocena i prognoza wpływu drgań gruntu na powierzchnię w oparciu o ogólne zależności uwzględniające energię sejsmiczną, odległość epicentralną oraz amplifikację drgań przez przypowierzchniową warstwę podłoża gruntowego, powinna uwzględniać także kierunkowość radiacji ogniska wstrząsu (źródła sejsmicznego).

Uzyskane rozwiązania w tym zakresie mają nie tylko znaczenie poznawcze, ale także praktyczne, gdyż ze względu na wysoką sejsmiczność indukowaną działalnością górniczą niezwykle istotnym problemem jest bardziej dokładna charakterystyka tych oddziaływań. Stanowi ona bowiem ważny element zarówno ochrony środowiska, jak i kształtowania partnerskiego układu między górnictwem a lokalnymi społecznościami, szczególnie w aspekcie akceptacji działalności górniczej.

4.4. Metoda tomografii pasywnej

Metoda tomografii pasywnej opracowana w Laboratorium Geofizyki Górniczej GIG jest nowym i bardzo efektywnym narzędziem do badania właściwości mechanicznych masywu skalnego i oceny zagrożenia sejsmicznego przy użyciu rejestracji z lokalnych kopalnianych sieci sejsmologicznych [4]. Jak wykazały badania zmiany pola prędkości fali sejsmicznej korelują się między innymi ze zmianami stanu zagrożenia sejsmicznego oraz z poziomem spekał masywu skalnego. Oprogramowanie komputerowe metody tomografii pasywnej wykorzystuje w procedurze obliczeniowej optymalizacyjne algorytmy ewolucyjne oraz Levenberga-Marquardta z użyciem regularyzacji. Takie podejście poprawia stabilność uzyskiwanych rozwiązań i pozwala na wdrażanie tej metody w polskich kopalniach rud miedzi i węgla kamiennego. Metoda tomografii pasywnej jest jedyną sejsmiczną metodą pozwalającą na bezinwazyjne prześwietlanie górotworu w kopalniach głębinowych na dużych obszarach obejmujących kilka ścian eksploatacyjnych. W metodzie tomografii pasywnej wykorzystuje się potwierdzoną laboratoryjnie zależność, że zmienność pola odkształceń i naprężeń w czasie powoduje również zmienność pola prędkości fal sejsmicznych. Ta przesłanka pozwala na wykorzystanie tomografii pasywnej do wyznaczania obszarów zagrożonych sejsmicznie w określonym czasie rozwoju eksploatacji. Z tego względu obrazy pola prędkości wykonywane cyklicznie umożliwiają śledzenie zmian pola naprężeń w górotworze. Wyniki obliczeń metodą tomografii pasywnej mogą służyć do wyznaczania i śledzenia zmian w większych obszarowo strefach zagrożenia sejsmicznego. Informacja taka pozwala na bezpieczniejsze planowanie eksploatacji oraz wskazuje miejsca, gdzie należy zastosować profilaktykę tąpniową. Tomografia pasywna pozwala w rzeczywistych warunkach geologiczno-górniczych

śledzić całościowo stan górotworu w miejscach oddalonych od pokładu (nieдоступnych innymi metodami). W przypadku dysponowania siecią sejsmologiczną o geometrii przestrzennej, możliwe jest wykonywanie obrazów pola prędkości w wymiarze przestrzennym 3D. Taki obraz daje pełniejsze rozpoznanie oraz ocenę zagrożenia sejsmicznego, niż obraz w płaszczyźnie poziomej.

5. Podsumowanie

Poziom aktywności sejsmicznej w Górnśląskim Zagłębiu Węglowym w analizowanym okresie 1993÷2012 zależał zarówno od intensywności eksploatacji, jak i od zmienności budowy litologicznej i tektonicznej. Zmniejszenie się liczby wstrząsów w latach dziewięćdziesiątych w porównaniu z końcem lat siedemdziesiątych i latami osiemdziesiątymi ubiegłego stulecia związane było z procesem restrukturyzacji przemysłu węglowego oraz szeroką profilaktyką tąpnięć, obejmującą dobór odpowiednich systemów i metod eksploatacji, a także odprężanie górotworu przez stosowanie metod aktywnych.

Przedstawione w artykule wyniki badań sejsmologicznych prowadzonych systematycznie od wielu lat w GIG miały na celu wzrost informatywności metody seismologii górniczej. Metoda ta stosowana do prognozy i kontroli zagrożenia sejsmicznego i tąpnięć może dostarczać całego szeregu parametrów opisujących procesy geomechaniczne zachodzące w górotworze kopalnianym.

Koniecznym warunkiem dla osiągnięcia tego celu jest utworzenie przestrzennych geometrii sieci sejsmologicznych, co pozwoli przede wszystkim na poprawę określania głębokości ognisk wstrząsów, analizę przestrzenno-czasowych rozkładów parametrów geofizycznych oraz wdrożenie dodatkowych metod interpretacyjnych (np. analiza zmian pola prędkości w górotworze w oparciu o metodę tomografii pasywnej, wyznaczanie wartości ilościowej parametru *PPV*, badanie mechanizmów ognisk wstrząsów).

Literatura

1. *Aki K., Richards P.G.* (1980): Quantitative Seismology – Theory and Methods, Vol. 1, 2, W.H. Freeman and Co., San Francisco.
2. *Barański A., Dubinski J., Lurka A., Mutke G., Stec K.* (2012): Metoda seismologii górniczej oceny stanu zagrożenia sejsmicznego i tąpnięć. [w]: Zasady stosowania metody kompleksowej i metod szczegółowych oceny stanu zagrożenia tąpnięć w kopalniach węgla kamiennego. Wydaw. GIG, Seria Instrukcje nr 22. Wydaw. GIG.
3. *Kwiatek G.* (2009): Foci – Tensor momentu sejsmicznego – Parametry Spektralne opis programu (publikacja internetowa www.seismologia-gornicza.pl/foci/).
4. *Lurka A.* (2009): Wybrane teoretyczne i praktyczne zagadnienia tomografii pasywnej w górnictwie podziemnym. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa, nr 879, Katowice.
5. *Lurka A., Logiewa H.* (2007): Sejsmologiczny System Obserwacji SOS jako narzędzie do obserwacji i interpretacji danych sejsmicznych w górnictwie zagrożonym tąpnięć. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa. Górnictwo i Środowisko nr III, s. 283÷296.
6. *Mutke G.* (2007): Charakterystyka drgań wywołanych wstrząsami górniczymi w odległościach bliskich źródła sejsmicznego w aspekcie oceny zagrożenia tąpnięć. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa, nr 872, Katowice.
7. *Mutke G.* (2011): Ocena stopnia potencjalnego zagrożenia stateczności wyrobisk trzyscianowych poddanych oddziaływaniu wstrząsów górotworu. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa. Górnictwo i Środowisko nr 4/2, s. 327÷335.
8. *Mutke G., Logiewa H.* (2012): Metoda pomiarów prędkości drgań cząstek górotworu (PPV) w chodnikach przyścianowych. [w]: Bezpieczeństwo obudowy podporowo-kotwowej w warunkach występowania wstrząsów górotworu (red. M. Turek). Wydaw. GIG, Katowice, s. 71÷85.
9. *Mutke G. i inni* (2009–2010): Modernizacja i rozbudowa Górnśląskiej Regionalnej Sieci Sejsmologicznej w Głównym Instytucie Górnictwa w Katowicach do monitorowania sejsmiczności z obszaru Górnego Śląska. Projekt aparaturowy o nr 401/E-263/S/2008-1 finansowany przez MNiSW.
10. *Mutke G. i inni* (2009–2011): Rozwój nowych metod prognozy zagrożenia sejsmicznego i zagrożenia tąpnięć z wykorzystaniem rejestracji wstrząsów. Praca badawcza-statutowa GIG o nr 11020299-120.
11. *Stec K.* (1997–2012): Zagrożenie sejsmiczne [w]: Raport roczny o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego (red. W. Konopko), Wydaw. GIG, Katowice.
12. *Stec K.* (2001): Rozwój i wykorzystanie Górnśląskiej Regionalnej Sieci Sejsmologicznej, [w]: Badania geofizyczne w kopalniach, Wydaw. IGSMiE PAN, Kraków, s. 179÷183.
13. *Stec K.* (2007): Characteristics of Seismic Activity of the Upper Silesian Coal Basin in Poland. Geophysical Journal International, Blackwell Publishing Ltd, V 168, s. 757÷768.
14. *Stec K.* (2009a): Aktywność sejsmiczna Górnśląskiego Zagłębia Węglowego i jej związek z geologicznymi właściwościami górotworu i parametrami eksploatacji, [w]: Stateczność Górotworu i obudowy przy łącznym obciążeniu statycznym i dynamicznym (red. A. Kidybiński), Wydaw. GIG, Katowice, s. 8÷48.
15. *Stec K.* (2009b): Metody wyznaczania mechanizmu ognisk wstrząsów. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko nr 4/1, s. 223÷236.
16. *Stec K.* (2012): Określenie stanu naprężeń w strefach zagrożenia sejsmicznego na podstawie parametrów mechanizmu ognisk wstrząsów. Przegląd Górniczy nr 2, s. 8÷15.
17. *Wiejacz P.* (1994): The SMT software, (niepublikowane).
18. *Wierzchowska Z.* (1961): Przyczyny wstrząsów na Górnym Śląsku. Prace GIG, Komunikat 268, Katowice.
19. *Wierzchowska Z.* (1962): Nowe poglądy na pochodzenie wstrząsów ziemi na Górnym Śląsku. Przegląd Górniczy nr 7–8, s. 418÷422.
20. *Wierzchowska Z.* (1981): Regionalna Sieć Mikrosejsmologiczna na Górnym Śląsku. Przegląd Górniczy nr 5, s. 222÷228.