

Określenie czynników wpływających na zagrożenie tąpnięciami w rejonie eksploatowanej ściany poprzez jednoczesne wykorzystanie tomografii sejsmicznej i analizy mechanizmów ognisk wstrząsów

W artykule przedstawiono wyniki tomografii sejsmicznej wykonanej na wybiegu ściany w pokładzie 510 w jednej z kopalń w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym oraz analizę mechanizmu ognisk średnio- i wysokoenergetycznych wstrząsów górotworu, jakie wystąpiły w rejonie tej ściany bezpośrednio po przeprowadzonych badaniach geotomograficznych. Uzyskany rozkład naprężeń w górotworze na wybiegu ściany oraz wyniki przeprowadzonej analizy mechanizmów ognisk wstrząsów skorelowano ze sobą oraz z warunkami górniczo-geologicznymi. Na podstawie przeprowadzonych badań określono czynniki mające dominujący wpływ na kształtowanie się zagrożenia tąpnięciami w rejonie eksploatowanej ściany w przyjętym przedziale czasowym. Jednoczesne wykorzystanie tomografii sejsmicznej i analizy mechanizmów ognisk wstrząsów umożliwiło pełniejsze rozpoznanie zagrożenia tąpniowego w trakcie prowadzonej eksploatacji.

1. WPROWADZENIE

Zagrożenie tąpnięciami jest jednym z najtrudniej przewidywalnych zagrożeń, a skutki wystąpienia tąpnięcia są groźne zarówno dla pracowników, jak i dla ruchu zakładu górniczego. Stąd niezwykle ważne są metody oceny samego zagrożenia i ryzyka z nim związanego [12]. Podstawą są w tym kontekście szeroko stosowane metody geofizyczne dla oceny stanu zagrożenia tąpnięciami występującego podczas eksploatacji pokładów węgla kamiennego.

Metody te, stosowane w sposób kompleksowy, mogą posłużyć również do lepszego zdiagnozowania czynników wpływających na zagrożenie tąpnięciami. Przykładem takiego zastosowania może być jednoczesne wykorzystanie tomografii sejsmicznej i analizy mechanizmów ognisk wstrząsów. Metody sejsmiczne są szczególnie użyteczne do określania

zmian stanu naprężeń w górotworze w zasięgu występowania niekorzystnych czynników górniczo-geologicznych (resztek, krawędzi eksploatacyjnych, uskoków). Analiza mechanizmów ognisk wstrząsów pozwala z kolei odtworzyć sposób destrukcji górotworu w strefie ogniskowej indukowanych eksploatacją górniczą wstrząsów. Wykorzystanie przedstawionych metod geofizycznych umożliwiło zdiagnozowanie czynników mających dominujący wpływ na stan zagrożenia tąpnięciami w rejonie wytypowanego wyrobiska eksploatacyjnego w jednej z kopalń GZW.

2. WARUNKI GÓRNICZO-GEOLOGICZNE

Objęta badaniami ściana prowadzona była na zawał w warstwie przystropowej pokładu 510 w kierunku

z zachodu na wschód. Miąższość pokładu w tym rejonie wahała się od 5,30 do 8,10 m, a głębokość jego zalegania osiągała maksymalnie -910 m.

W spągu pokładu 510 występował łupek ilasty, łupek piaszczysty oraz piaskowiec drobnoziarnisty, w stropie – łupek piaszczysty, piaskowiec drobnoziarnisty, łupek piaszczysty oraz łupek ilasty o sumarycznej miąższości nieprzekraczającej 13 m, powyżej których zalegał pokład 507. W odległości od około 70 m nad pokładem 510 występowały grube warstwy piaskowca o dużej wytrzymałości, które łącznie z występującymi między nimi warstwami łupków piaszczystych i ilastych posiadały miąższość dochodzącą do 60 m.

Od zachodniej do środkowej części wybiegu analizowanej ściany występowały strefy zaburzeń tektonicznych w postaci serii uskoków o przebiegu od SW-NE do WNW-ESE. Uskokki te posiadały zrzut od 1 do 5,5 m, a nachylenie płaszczyzn uskokowych zawierało się w przedziale od 30° do 85°. Występowanie uskoków o przebiegu zbliżonym do SW-NE oraz zrzucie 0,50 m i 0,80 m stwierdzono również w chodniku podścianowym. Ponadto na zachód od początku przedmiotowej ściany, w filarze dla przekopów skrzydłowych, występował uskok o zrzucie 25 m i przebiegu NW-SE.

Pole objętej badaniami ściany w całości znajdowało się pod wybranym pokładem 507 (eksploatację prowadzono do 2007 r.). Wcześniej dokonano tutaj również eksploatacji pokładu 502, zalegającego w odległości około 126 m nad pokładem 510. Na wybiegu analizowanej ściany występowała jednak resztką o nieregularnym kształcie wytworzona w pokładzie 501, zalegającym w odległości około 140 m nad pokładem 510.

3. METODYKA BADAŃ

3.1. Tomografia sejsmiczna

Metoda tomografii sejsmicznej stosowana jest na wybiegach prowadzonych ścian. Metoda prześwietlania sejsmicznego w wersji kinematycznej umożliwia odtworzenie rozkładu prędkości fal sejsmicznych w badanym fragmencie pokładu i skałach bezpośrednio otaczających, a w konsekwencji – wytypowanie obszarów podwyższonych naprężeń.

W metodzie tomografii sejsmicznej pomiary realizowane są w układzie płaszczyzny pokładu węgla. Prześwietlany obszar ograniczony jest najczęściej przez chodniki przyścianowe oraz ścianę. Przeważnie w jednym z chodników oraz w ścianie zlokalizowane

są punkty wzbudzenia fal sejsmicznych (typu eksplozywnego). W drugim chodniku przyścianowym znajdują się punkty odbioru drgań (sondy geofonowe).

Odpalenie kolejnych umieszczonych w otworach strzałowych ładunków materiału wybuchowego generuje fale sejsmiczne, które po przejściu przez badany fragment górotworu są rejestrowane przez sondy geofonowe. Ze względu na znacznie mniejszą gęstość pokładu węgla względem skał otaczających uzyskiwane jest pole falowe o charakterystycznej strukturze. Rejestrowane są m. in. podłużne fale sejsmiczne propagujące przez pokład węgla (bezpośrednie) oraz podłużne fale sejsmiczne propagujące po granicy między pokładem a skałami otaczającymi (refrakcyjne). W procesie interpretacji odczytuje się czasy przejścia wymienionych typów fal.

Promienie sejsmiczne przechodzące przez prześwietlany fragment górotworu traktowane są jako odcinki prostych. Prześwietlany obszar poddawany jest dyskretyzacji, a dla każdej celi obliczana jest długość przechodzącego przez nią promienia sejsmicznego. Czas przejścia poszczególnych typów fal sejsmicznych od punktów wzbudzenia do punktów odbioru można wówczas przedstawić w postaci skończonej sumy iloczynów długości promienia w każdej celi i występującej w niej powolności (odwrotności prędkości). Zagadnienie tomograficzne sprowadza się zatem do rozwiązania układu równań liniowych. Z powodu tego, że dany promień sejsmiczny na swojej drodze przecina określoną liczbę cel oraz że przez daną celę przechodzi przeważnie więcej niż jeden promień, nie można posłużyć się bezpośrednimi metodami rozwiązania takiego układu równań. Do rekonstrukcji pola prędkości fali podłużnej w pokładzie węgla oraz skałach otaczających najczęściej wykorzystywane są metody iteracyjne [3, 7, 5, 4]. Jedną z nich stanowi metoda ART, oparta na minimalizacji błędu rezydualnego stanowiącego różnicę między czasem zmierzonym a obliczanym w kolejnych krokach iteracyjnych. Algorytm ART wymaga określenia początkowego rozkładu prędkości w badanym obszarze, najczęściej poprzez uśrednienie prędkości promieniowych. W każdym cyklu iteracyjnym obliczany jest zbiór poprawek do wartości kolejnego rozkładu prędkości. Po przeanalizowaniu wszystkich promieni, z uwzględnieniem wagi obliczonych poprawek ze względu na długość promieni w poszczególnych celach, poprawki prędkości wprowadzane są do każdej celi.

W wyniku prześwietlania sejsmicznego uzyskuje się dwuwymiarowy rozkład prędkości fali podłużnej w pokładzie węgla oraz skałach otaczających. W obszarach wysokich prędkości fali występuje podwyższony stan naprężeń. Obszary te przeważnie

występują w zasięgu oddziaływania niekorzystnych czynników górniczo-geologicznych (resztek wytworzonych w pokładach sąsiednich, krawędzi eksploatacyjnych, uskoków).

Pomiary metodą tomografii sejsmicznej wykonano w polu wybierkowym wytypowanej ściany, po uzyskaniu przez nią średniego wybiegu około 140 m. Obszar badań obejmował kolejne 250 m wybiegu ściany. Podczas tomografii w każdym z 13 otworów strzałowych (zlokalizowanych w chodniku podścianowym i ścianie) odpalano kolejno po około 400 g materiału wybuchowego. Wzbudzone fale sejsmiczne rejestrowane były przy pomocy 12 sond geofonowych wchodzących w skład aparatury sejsmicznej PASAT-M. Każda z tych sond posiada własny moduł pomiarowo-transmisyjny MPT. Moduł wyzwala pomiarów MWP służy zarówno do inicjowania pomiarów, jak i transmisji przetworzonych sygnałów sejsmicznych, które pochodzą z modułu pomiarowego MPT [10]. Dane przetworzone na postać cyfrową zapamiętywane są w pamięci modułu PDA. Ich transmisja odbywa się drogą radiową (Bluetooth). Poprzez moduł PDA istnieje możliwość obserwacji zapisów sejsmicznych w czasie rzeczywistym i jednoczesne zapisanie danych z sesji pomiarowej w pamięci urządzenia. W trakcie pomiaru częstotliwość próbkowania wynosiła 5 kHz. Użyta ilość materiału wybuchowego przy uwzględnieniu topologii układu pomiarowego umożliwiła ustawienie wzmocnienia kanałów pomiarowych na poziomie 0 dB.

Wyniki badań z modułu PDA po wywiezieniu na powierzchnię transmitowane są do komputera PC, gdzie możliwe jest wykonanie analizy sygnałów w oprogramowaniu PASAT SSA – Seismic Signals Analysis. Oprogramowanie PASAT SSA daje możliwość wizualizacji i przetwarzania sejsmogramów z całej sesji pomiarowej oraz przeprowadzania analizy sygnałów sejsmicznych zarejestrowanych przez aparaturę PASAT-M. W programie tym na podstawie ustalonej topologii pomiaru oraz odczytanych pierwszych wejść fali podłużnej bezpośredniej i refrakcyjnej dla wszystkich możliwych kombinacji punktów wzbudzenia i odbioru możliwe jest utworzenie dwuwymiarowych rozkładów prędkości fali podłużnej w pokładzie węgla oraz skałach otaczających.

3.2. Analiza mechanizmów ognisk wstrząsów

Wstrząsy powstają w wyniku działania określonych systemów sił na pewien fragment górotworu, który stanowi ognisko wstrząsu. Odpowiednio zorientowane w przestrzeni systemy sił determinują ściśle określone dla nich przebiegi procesów dynamicznych [13], które są źródłem promieniowania sejsmicznego

o ściśle określonej charakterystyce. Sejsmogramy zawierają informację o układzie sił działających w ognisku wstrząsu, a także o przebiegu zachodzącego w nim procesu dynamicznego [11]. W ogniskach wstrząsów indukowanych eksploatacją górniczą, oprócz procesów ścinania na płaszczyznach uskoków, mogą występować także inne mechanizmy, np. eksplozyjne czy implozyjne [9].

Do określania mechanizmu ognisk wstrząsów górotworu stosuje się metodę inwersji tensora momentu sejsmicznego. Tensor momentu sejsmicznego opisuje układ sił działających w źródle sejsmicznym jako liniową kombinację par sił. Opisuje on źródło sejsmiczne w sposób zupełny i stanowi najpełniejszy opis systemu sił występujących w ognisku wstrząsu [2]. Przemieszczenia w polu dalekim wywołane przez system sił występujących w źródle sejsmicznym są sumą przemieszczeń wywołanych przez poszczególne pary sił [1]. Inwersja tensora momentu sejsmicznego polega na obliczeniu jego składowych na podstawie zarejestrowanego przez sieć sejsmologiczną pola przemieszczeń.

Dekompozycja tensora momentu sejsmicznego na część izotropową (opisującą zmiany objętościowe w źródle) oraz dewiatorową, na którą składa się liniowy skompensowany dipol wektorowy (CLVD) i podwójna para sił (DBCP), jest najczęściej przyjmowanym opisem źródła sejsmicznego [9, 6, 11]. Część izotropowa (I) opisuje zmiany objętości w źródle („+” – eksplozja, „-” – implozja). Liniowy skompensowany dipol wektorowy (CLVD) opisuje mechanizm zbliżony do jednoosiowego ściskania („-”) lub rozciągania („+”). Podwójna para sił (DBCP) dotyczy procesów ścinania i poślizgu. Standardowo określa się trzy modele ogniska wstrząsu, opisane przez trzy rodzaje tensora momentu sejsmicznego: pełny (zawierający I, CLVD i DBCP), dewiatoryczny (zawierający CLVD i DBCP) oraz czystego ścinania (zawierający wyłącznie DBCP). Przewaga części izotropowej (I) występuje dla wstrząsów górotworu powstających np. w wyniku nacisku na pokład nadległych warstw skalnych i przekroczenia jego wytrzymałości na ściskanie (mechanizm eksplozyjny) czy wstrząsów związanych z przemieszczaniem się skał stropowych do pustki wytworzonej w wyniku eksploatacji (mechanizm implozyjny). Liniowy skompensowany dipol wektorowy (CLVD) może opisywać pęknięcie filarów. Mechanizm, w którym dominuje podwójna para sił (DBCP), dotyczy wstrząsów związanych głównie z pękaniem znajdujących się w stropie pokładu grubych warstw skał cechujących się dużą sztywnością i wytrzymałością (np. grubej warstwy mocnych skał) lub uaktywnianiem się występujących w górotworze uskoków.

Obliczenia tensora momentu sejsmicznego zostały wykonane w programie FOCI w oparciu o inwersję amplitud pierwszych wstąpień fali P, przy uwzględnieniu kierunków pierwszych wychyleń w domenie czasu. Obliczono mechanizm ognisk wszystkich średnio- i wysokoenergetycznych wstrząsów, jakie wystąpiły w okresie 20 dni od wykonania tomografii sejsmicznej w przedmiotowej ścianie. Mechanizmy ognisk wstrząsów zostały określone na podstawie zapisów kopalnianej sieci seismologicznej. Stanowiska sejsmometryczne były rozmieszczone równomiernie i optymalnie wokół objętej badaniami ściany. Błąd wyznaczenia epicentrum wstrząsu w zależności od branych pod uwagę stanowisk sejsmometrycznych zawierał się w przedziale od ponad 20 do blisko 35 m. Przyjęto zatem poprawne określenie poziomych współrzędnych ognisk wstrząsów. Błąd wyznaczenia hipocentrum wstrząsów był większy i w skrajnych przypadkach osiągał wartość ponad 60 m. Z tego względu dokonano udokładnienia składowej pionowej ognisk wstrząsów w programie FOCI [8], przyjmując rozwiązanie tensora momentu sejsmicznego dla największej wartości współczynnika jakości rozwiązania oraz najmniejszego błędu jego wyznaczenia.

4. WYNIKI BADAŃ

4.1. Tomografia sejsmiczna

Wykonana na wybiegu wytypowanej ściany tomografia sejsmiczna wykazała, że prędkości propagacji podłużnej fali sejsmicznej w skałach otaczających zmieniają się w zakresie od 3650 do 4450 m/s (średnio wynoszą 4050 m/s). Wartości maksymalne prędkości fali podłużnej w stropie (4400-4450 m/s) występują w rejonie frontu ściany, w odległości około 110-120 m na południe od chodnika nadścianowego, w rejonie występowania zaburzeń uskokowych. W rejonie występowania maksymalnych prędkości fali podłużnej w stropie występuje wysoki gradient prędkości podłużnej fali sejsmicznej.

Prędkości propagacji fali podłużnej w węglu zawierają się w przedziale od 1620 do 2220 m/s. Na większości prześwietlonego obszaru prędkość ta zawiera się w przedziale od 2000 do 2100 m/s. Obszary, w których prędkość podłużnej fali sejsmicznej osiąga maksymalne wartości (2170-2220 m/s), koncentrują się w pobliżu występowania strefy zaburzeń uskokowych. Obliczona na podstawie uzyskanych prędkości oraz prędkości odniesienia dla pokładu 510 na głębokości jego występowania (2030 m/s) anomalia sejsmiczna

zawiera się w przedziale od -20,2% do +9,4%. Nie występuje tutaj już praktycznie efekt odprężenia, spowodowany eksploatacją odprężającą dokonaną w pokładzie 507. Na przeważającym prześwietlonym wybiegu ściany anomalia sejsmiczna nie przekracza jednak 5%, co świadczy o braku wzrostu naprężeń. Obszary, w których anomalia sejsmiczna przekracza 5%, korelują z występowaniem strefy zaburzeń uskokowych. W północnym odcinku ściany (na północ od strefy zaburzeń uskokowych) anomalia sejsmiczna osiąga wartości mniejsze niż -10%, co może być spowodowane wykonywaniem aktywnej profilaktyki tapaniowej z frontu ściany w postaci cyklicznych strzelań wstrząsowych.

4.2. Analiza mechanizmów ognisk wstrząsów

Obliczone w programie FOCI parametry seismologiczne oraz mechanizmu ognisk średnio- i wysokoenergetycznych wstrząsów występujących w rejonie przedmiotowej ściany w okresie do 20 dni po wykonaniu na jej wybiegu tomografii sejsmicznej zostały przedstawione w tabeli 1.

W ogniskach wstrząsów wysokoenergetycznych (rzędu 10^5 J), jakie wystąpiły w rejonie objętej badaniami ściany w wydzielonym okresie, stwierdzono dominację mechanizmu ścinającego normalnego. Udział składowej ścinającej w pełnym rozwiązaniu mechanizmu ognisk tych wstrząsów zawierał się w przedziale od ponad 46% do ponad 82% (średnio około 65,2%). Średni udział pozostałych składowych, tj. I i CLVD, był mniejszy i wynosił odpowiednio 18,9% i 15,9%. Rozwiązania tensora momentu sejsmicznego dla wstrząsów o energii rzędu 10^5 J o największej wartości współczynnika jakości rozwiązania oraz najmniejszym błędzie jego wyznaczenia uzyskano dla głębokości z przedziału od około -570 do -510 m n.p.m. (średnio około -548 m n.p.m.). Głębokości te w miejscu występowania ognisk analizowanych wstrząsów odpowiadają głębokości zalegania grubej warstwy piaskowca. W przypadku mechanizmów ognisk wszystkich wstrząsów o energii rzędu 10^5 J azymut jednej z płaszczyzn nodalnych był quasi-równoległy do frontu ściany i zawierał się w przedziale od około 151° do około 168° . Najbardziej prawdopodobny kierunek przemieszczenia mas skalnych w ogniskach pierwszych pięciu wstrząsów o energii rzędu 10^5 J zawierał się w przedziale od około -116° do około -147° (średnio $-133,4^\circ$), natomiast upad wynosił od blisko 11° do ponad 32° (średnio $22,8^\circ$). Wstrząsy te należy zatem wiązać z uginaniem się i pójaniem grubej warstwy piaskowca. W przypadku ostatniego, szóstego wstrząsu o energii rzędu 10^5 J kątpromieszczenia i upadu związany z wyznaczoną

Tabela 1.

Parametry sejsmologiczne i mechanizmu ognisk wstrząsów występujących w rejonie przedmiotowej ściany w wyznaczonym przedziale czasowym (badania własne)

Lp.	Data	Czas		Energia [J]	Współrzędne ogniska w układzie Sucha Góra			Lokalizacja względem ściany ² (odległość [m])	Składowe tensora [%]			Typ ³
		h	m		X [m]	Y [m]	Z' [m]		I	CLVD	DBCP	
1.	2013-03-04	22	14	2,0E+04	15360	3820	-601	W (30)	47,4	47,8	4,8	EXPL
2.	2013-03-04	23	08	2,0E+04	15330	3810	-591	W (40)	35,5	34,7	29,8	EXPL
3.	2013-03-06	03	28	8,0E+05	15250	3910	-550	Z (-30)	-23,7	-19,8	56,5	NO
4.	2013-03-06	21	16	3,0E+04	15390	4000	-588	Z (-150)	-47	-49,1	3,9	IMPL
5.	2013-03-07	12	28	8,0E+04	15170	3660	-575	U (220)	8,7	-11,8	79,5	NO
6.	2013-03-07	13	57	6,0E+04	15330	4110	-495	U (-250)	-10	24,4	65,6	NO
7.	2013-03-08	22	26	8,0E+05	15340	3890	-553	Z (-50)	-16,6	-7,2	76,2	NO
8.	2013-03-08	22	31	2,0E+04	15320	3860	-594	rejon frontu	45,4	39,2	15,4	EXPL
9.	2013-03-11	21	30	8,0E+05	15260	3880	-569	Z (-30)	-29,2	-24,4	46,4	NO
10.	2013-03-14	04	59	8,0E+04	15400	4010	-603	U (-180)	-18,6	-20,6	60,8	NO
11.	2013-03-14	17	40	4,0E+05	15290	3880	-514	Z (-30)	-21,3	-15,1	63,6	NO
12.	2013-03-15	20	49	9,0E+05	15260	3910	-544	Z (-60)	0,8	16,9	82,3	NO
13.	2013-03-17	16	36	6,0E+04	15370	3950	-593	Z (-120)	-38,2	-31	30,8	IMPL
14.	2013-03-18	06	55	8,0E+04	15300	3900	-576	Z (-50)	-33,7	-26,6	39,8	IMPL
15.	2013-03-19	12	28	4,0E+05	15280	4000	-560	Z (-160)	-21,9	-12,1	66	NO
16.	2013-03-19	17	54	6,0E+04	15410	3950	-625	Z (-130)	-34,8	-32,9	32,3	IMPL
17.	2013-03-20	16	32	7,0E+04	15260	3890	-543	Z (-50)	-25,1	-20,5	54,5	NO
18.	2013-03-21	00	51	8,0E+04	15300	3880	-560	Z (-50)	-27,2	-29,5	43,3	NO

¹ głębokość ognisk określona z dopasowania rozwiązania wg programu FOCI,

² Z – zroby, W – wybieg ściany, U – strefa uskokowa, poza polem ściany,

³ typ mechanizmu: NO – poślizgowy normalny, EXPL – eksplozyjny, IMPL – implozyjny.

płaszczyzną nodalną wyniósł odpowiednio -106° i 78° . Wstrząs ten odbiegał od pozostałych w tej klasie energetycznej również pod względem odległości od frontu ściany (wynosiła ona 160 m, podczas gdy pozostałe wstrząsy o energii rzędu 10^5 J występowały w odległości między 30 a 60 m za frontem ściany). Wstrząs ten należy wiązać najprawdopodobniej z oddzieleniem się bloku skalnego i jego przemieszczeniem niemal pionowo w dół w kierunku zrobów. Dla każdego wstrząsu o energii rzędu 10^5 J główna oś rozciągania miała przebieg quasi-prostopadły względem frontu ściany.

Wstrząsy średnioenergetyczne (rzędu 10^4 J) posiadały zarówno mechanizm ścinający, jak i eksplozyjny oraz implozyjny. Rozwiązania tensora momentu sejsmicznego dla tych wstrząsów o największej wartości współczynnika jakości rozwiązania oraz najmniejszym błędzie jego wyznaczenia uzyskano dla szerokiego przedziału głębokości, tj. od -625 do -495 m n.p.m. Takie zróżnicowanie głębokości występowania ognisk wstrząsów wynika z różnego sposobu ich powstawania. Wstrząsy te występowały zarówno na wybiegu ściany, jak i w jej zrobach, a także poza polem ściany, w strefach zaburzeń uskokowych.

Z kolei 5 wstrząsów o energii rzędu 10^4 J cechowało się mechanizmem ścinającym normalnym. Udział poszczególnych składowych w rozwiązaniu pełnym tensora momentu sejsmicznego dla tych wstrząsów wynosił średnio: I = 17,9%, CLVD = 12%, DBCP = 61,1%. Największy udział składowej ścinającej (od blisko 61% do blisko 80%) występował w ogniskach 3 wstrząsów, które zostały zlokalizowane w strefach zaburzeń uskokowych. Pierwszy z nich, o energii $8,0 \cdot 10^4$ J, wystąpił w dniu 07.03.2013 r. i został zlokalizowany w zrobach poprzedniej ściany prowadzonej w pokładzie 510, w strefie licznych zaburzeń uskokowych. Parametry jednej z wyznaczonych dla tego wstrząsu płaszczyzn nodalnych ($\Phi = 66,3^\circ$, $\delta = 12,8^\circ$, $\lambda = -147,3^\circ$) korelują z parametrami uskoku normalnego $h \sim 7$ m. Wstrząs ten był najprawdopodobniej związany z uaktywnieniem się tego uskoku. Drugi wstrząs, o energii $6,0 \cdot 10^4$ J, który wystąpił w dniu 07.03.2013 r., został zlokalizowany w strefie zaburzeń związanej z uskokiem $h \sim 25$ m. Parametry jednej z wyznaczonych dla tego wstrząsu płaszczyzn nodalnych ($\Phi = 291,7^\circ$, $\delta = 69,8^\circ$, $\lambda = -87,3^\circ$) są zbieżne z parametrami uskoku $h \sim 25$ m. Uskok ten

uaktywnił się najprawdopodobniej w wyniku prowadzonej eksploatacji. Trzeci wstrząs, o energii $8,0 \cdot 10^4$ J, wystąpił w dniu 14.03.2013 r. i został zlokalizowany w strefie zaburzeń związanych z uskokiem $h \sim 2$ m i w sąsiedztwie krawędzi eksploatacyjnej wytworzonej w pokładzie 507. Parametry jednej z wyznaczonych dla tego wstrząsu płaszczyzn nodalnych ($\Phi = 271,7^\circ$, $\delta = 79,3^\circ$, $\lambda = -94,9^\circ$) są zbieżne z parametrami uskoku $h \sim 2$ m. Wystąpienie tego wstrząsu było spowodowane najprawdopodobniej rozładowaniem naprężeń występujących w rejonie przedmiotowego uskoku w wyniku dokonanej eksploatacji. Pozostałe 2 wstrząsy o energii rzędu 10^4 J ($7,0 \cdot 10^4$ J w dniu 20.03.2013 r. oraz $8,0 \cdot 10^4$ J w dniu 21.03.2013 r.), cechujące się mechanizmem poślizgowym, wystąpiły w zrobach przedmiotowej ściany, każdy w odległości około 50 m za frontem ściany. Najlepsze dopasowanie rozwiązania mechanizmu ognisk tych wstrząsów uzyskano dla głębokości odpowiadającej głębokości zalegania grubej warstwy piaskowca (odpowiednio -543 i -560 m n.p.m.). Azymut jednej z płaszczyzn nodalnych wyznaczonych dla tych wstrząsów był równoległy do frontu ściany (odpowiednio $159,4^\circ$ i $156,6^\circ$), a przemieszczenie następowało w kierunku wytworzonych zrobów (odpowiednio $\lambda = -104,8^\circ$ i $\lambda = -122,1^\circ$). Upad płaszczyzn nodalnych wynosił odpowiednio $70,6^\circ$ i $61,9^\circ$. Wystąpienie tych wstrząsów związane było z pęknięciem w grubej warstwie piaskowca, a następnie z przemieszczeniem bloków skalnych w kierunku wytworzonych zrobów.

Spśród wstrząsów o energii rzędu 10^4 J, które wystąpiły w zrobach przedmiotowej ściany, 4 posiadały mechanizm implozyjny. Udział poszczególnych składowych w pełnym rozwiązaniu tensora momentu sejsmicznego dla tych wstrząsów wyniósł średnio: $I = -38,4\%$, $CLVD = 34,9\%$, $DBCP = 26,7\%$. Najlepsze dopasowanie rozwiązania tensora momentu sejsmicznego uzyskano dla głębokości z przedziału od -625 m n.p.m. do -576 m n.p.m. Uzyskane wyniki wskazują na związek omawianych wstrząsów z procesami destrukcji zachodzącymi w stropie bezpośrednim i tworzeniem się zawału. Ze względu na przewagę składowych I i CLVD dla tych wstrząsów nie określono dominującej płaszczyzny pęknięcia w ognisku.

W 3 ogniskach wstrząsów, które wystąpiły na wybiegu ściany, dominowała eksplozja. Udokładniona składowa pionowa ognisk tych wstrząsów odpowiada w przybliżeniu głębokości zalegania pokładu 510. W rozwiązaniu pełnym mechanizmu ognisk tych wstrząsów udział składowej eksplozyjnej wyniósł średnio $42,8\%$, jednoosiowego rozciągania – $40,5\%$, a składowej ścinającej – $16,7\%$. Duży udział składowych eksplozyjnej i jednoosiowego rozciągania w mechanizmie tego typu ognisk wstrząsów wskazu-

je na dominację procesów eksplozyjnych w pokładzie 510 i skałach stropu bezpośredniego wskutek przekroczenia ich wytrzymałości naprężeniowej. Ze względu na przewagę składowych I i CLVD dla tych wstrząsów nie określono dominującej płaszczyzny pęknięcia w ognisku.

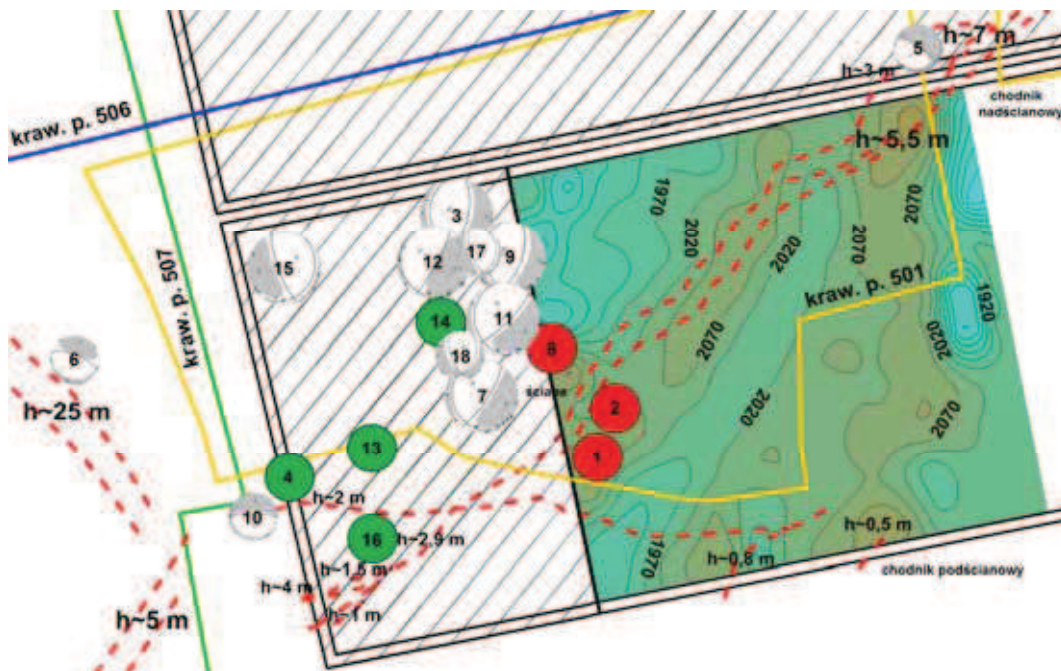
4.3. Mechanizmy ognisk wstrząsów a wyniki tomografii sejsmicznej

Wszystkie wstrząsy o mechanizmie eksplozyjnym wystąpiły w rejonie frontu ściany, w pobliżu strefy zaburzeń uskokowych, czyli w obszarze stwierdzonych tomografią sejsmiczną maksymalnych prędkości fali podłużnej zarówno w pokładzie, jak i skałach otaczających pokład 510. Występowanie tego obszaru najprawdopodobniej było spowodowane koincydencją ciśnienia eksploatacyjnego i naprężeń tektonicznych występujących w rejonie strefy zaburzeń uskokowych.

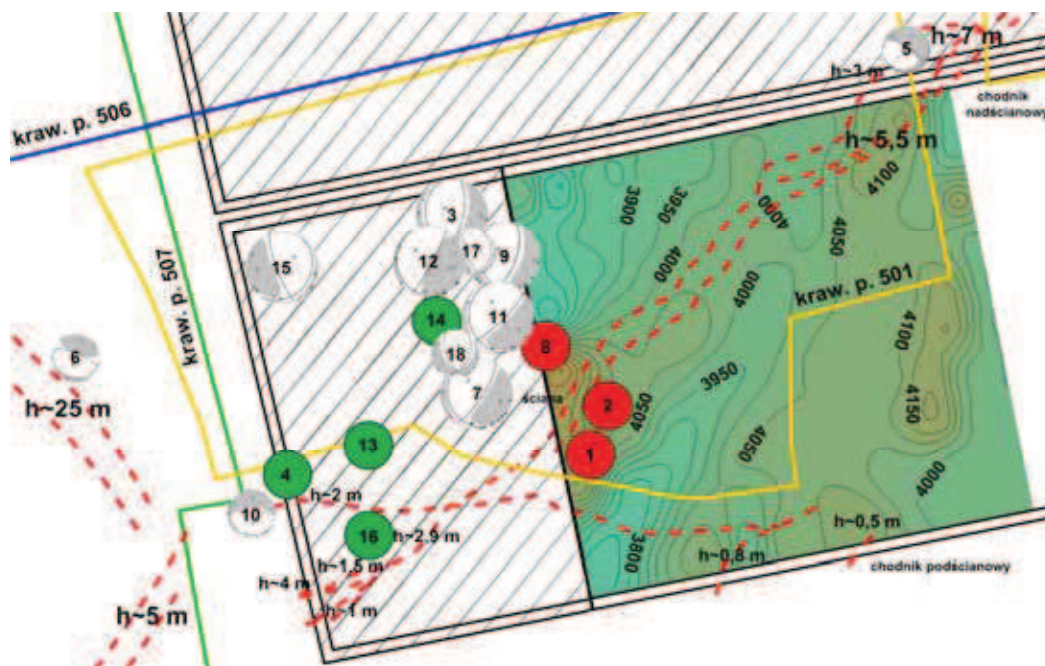
Ponadto wstrząs o energii $8,0 \cdot 10^4$ J, który wystąpił w dniu 07.03.2013 r., zlokalizowany został co prawda poza polem ściany, ale w rejonie stwierdzonego tomografią sejsmiczną obszaru podwyższonych prędkości fali podłużnej zarówno w pokładzie, jak i skałach otaczających. Występowanie tego obszaru związane było z występowaniem strefy licznych zaburzeń uskokowych, a najprawdopodobniej z uskokiem $h \sim 7$ m.

Ogniska pozostałych wstrząsów o energii rzędu 10^4 J związane były z tworzeniem się zawału (mechanizm implozyjny) lub ze strefami zaburzeń uskokowych i pękaniem grubej warstwy piaskowca (wstrząsy o mechanizmie poślizgowym w zrobach oraz poza polem przedmiotowej ściany) i nie były bezpośrednio związane ze stanem naprężeń występującym na prześwietlonym wybiegu. Podobnie wstrząsy o energii rzędu 10^5 J, które związane były z pękaniem grubej warstwy piaskowca, zalegającego w odległości ponad 70 m nad pokładem 510.

Rozkład prędkości fali podłużnej w pokładzie oraz skałach bezpośrednio go otaczających wraz z wynikami analizy mechanizmów ognisk wstrząsów został przedstawiony na mapie pokładu 510 (rysunki 1. i 2.). Ogniska wstrząsów o mechanizmie eksplozyjnym zostały oznaczone kołami w kolorze czerwonym, o mechanizmie implozyjnym – kołami w kolorze zielonym, natomiast ogniska o mechanizmie poślizgowym – kołami w kolorach białym (obszary kompresji) i szarym (obszary tensji). Koła oznaczające ogniska wstrząsów o energii rzędu 10^5 J posiadają większe średnice w porównaniu do kół symbolizujących ogniska wstrząsów o energii rzędu 10^4 J. Wewnątrz kół symbolizujących ogniska wstrząsów zostały zamieszczone numery oznaczające kolejność ich występowania (zgodnie z tabelą 1.)



Rys. 1. Rozkład prędkości fali podłużnej w pokładzie 510 i wyniki analizy mechanizmów ognisk wstrząsów na tle mapy pokładu 510 (opracowanie własne)



Rys. 2. Rozkład prędkości fali podłużnej w skałach otaczających pokładu 510 i wyniki analizy mechanizmów ognisk wstrząsów na tle mapy pokładu 510 (opracowanie własne)

5. PODSUMOWANIE

Wykonana tomografia sejsmiczna wykazała występowanie stref najwyższych prędkości fali podłużnej bezpośredniej i refrakcyjnej w rejonie frontu ściany, w pobliżu występowania strefy zaburzeń uskoku. Występowanie takiego obszaru związane było najprawdopodobniej z nałożeniem się ciśnienia eks-

ploatacyjnego i naprężeń w strefie zaburzeń tektonicznych. Wystąpiły tutaj 3 średnioenergetyczne wstrząsy o mechanizmie eksplozywnym, świadczącym o przekroczeniu wartości wytrzymałościowych pokładu i skał otaczających. Maksymalne prędkości stwierdzono również w strefie zaburzeń uskoku w rejonie chodnika nadścianowego. Wystąpił tutaj wstrząs o mechanizmie poślizgowym, związany najprawdopodobniej z uaktywnieniem się uskoku $h \sim 7$ m.

Składowa pionowa ognisk wymienionych wyżej wstrząsów korelowała z głębokością zalegania pokładu 510 i skał w jego bezpośrednim otoczeniu. Metoda tomografii sejsmicznej potwierdziła zatem występowanie stref najbardziej narażonych na samostne wstrząsy górotworu na wybiegu ściany, co zostało przedstawione na rysunkach 1. i 2.

W ogniskach wstrząsów wysokoenergetycznych, jakie wystąpiły w analizowanym przedziale czasu, dominował mechanizm ścinający. Udokładnienie składowej pionowej ognisk tych wstrząsów pozwoliło stwierdzić, iż były one związane z uaktywnieniem się grubej warstwy piaskowca zalegającej w odległości powyżej 70 m nad pokładem 510. Na powstawanie tych wstrząsów wpływ mogła mieć również pozostawiona w pokładzie 501 resztką, będąca źródłem dodatkowych naprężeń w skałach stropu zasadniczego. Ogniska wszystkich wysokoenergetycznych wstrząsów wystąpiły w zasięgu wymienionej resztki.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, iż czynnikami mającymi dominujący wpływ na stan zagrożenia tąpnięciami w wytypowanej ścianie są występowanie stref zaburzeń uskokowych na jej wybiegu, gdzie generowane są wstrząsy średnioenergetyczne, ale w bliskiej odległości od pokładu, oraz pęknięcie wstrząsogennej warstwy piaskowca w zasięgu resztki wytworzonej w pokładzie 501, generujące wstrząsy wysokoenergetyczne.

Przedstawione wyniki pokazują użyteczność jednoczesnego zastosowania tomografii sejsmicznej i analizy mechanizmów ognisk wstrząsów do wyznaczania czynników najbardziej wpływających na zagrożenie tąpnięciami podczas prowadzonej eksploatacji.

Literatura

1. Aki K., Richards P. G.: *Quantitative Seismology – Theory and Methods*, W. H. Freeman & Co., vol. 1, 2, San Francisco 1980.
2. Backus G., Mulcahy M.: *Moment Tensor and Other Phenomenological Description of Seismic Sources*, Geophys. J. R. Astr. Soc., 1976, s. 341-361.
3. Dubiński J.: *Sejsmiczna metoda wyprzedzającej oceny zagrożenia wstrząsami górniczymi w kopalniach węgla kamiennego*, Główny Instytut Górnictwa, Katowice 1989.
4. Dubiński J.: *Metody sejsmiczne w górnictwie – techniki pomiarowe i interpretacyjne*. W: *Badania geofizyczne w kopalniach*, red. J. Dubiński, Z. Pilecki, W. M. Zuberek, Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków 2001, s. 285-306.
5. Dubiński J., Konopko W.: *Tąpnięcia. Ocena, prognozowanie, zwalczanie*, Główny Instytut Górnictwa, Katowice 2000, s. 194-265.
6. Gibowicz S. J.: *Mechanizm ognisk wstrząsów. Wstrząsy górnicze – mechanizm, lokalizacja i energia*, Szkoła Eksploatacji Podziemnej, Szczyrk 1995, s. 5-30.
7. Goszcz A., Dubiński J., Dworak J.: *Praktyczne aspekty zastosowania tomografii sejsmicznej w górnictwie podziemnym*. W: *Wybrane zagadnienia lokalizacji ognisk wstrząsów górniczych i geotomografii sejsmicznej*, red. mgr inż. E. Gliwa, mgr inż. A. Goździk, Główny Instytut Górnictwa, Katowice 1989, s. 86-120.

8. Kwiatek G.: *Foci – tensor momentu sejsmicznego – parametry spektralne. Opis programu* [online], 2009 (dostęp: sierpień 2013), dostępny w Internecie: www.sejsmologia-gornicza.pl/foci/download.php.
9. Marcak H., Zuberek W. M.: *Geofizyka górnicza*, Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1994, s. 143-149.
10. Oset K., Chmielarz S., Augustyniak A.: *Nowe rozwiązania w dziedzinie mobilnej aparatury sejsmicznej – PASAT M*. „Mechanizacja i Automatyza Górnictwa”, 2010, nr 8(474), s.18-29.
11. Stec K.: *Mechanizm ogniska wstrząsu i metody jego wyznaczenia*. Warsztaty z cyklu „Zagrożenia naturalne w górnictwie”, 2009, s. 287-305.
12. Trenczek S., Fedko M.: *Poziomy ryzyka dla pracowników oraz ryzyka utraty funkcjonalności wyrobiska w rejonach ścian*. „Prace Naukowe GIG”, 2011, nr 4/2, s. 501-516.
13. Wiejacz P.: *Badania mechanizmów wstrząsów górniczych w Polsce*. W: *Badania geofizyczne w kopalniach*, red. J. Dubiński, Z. Pilecki, W. M. Zuberek, Wydawnictwo IGSMiE, Kraków 2001, s. 25-33.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.