

**Zeszyty Naukowe***Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią
Polskiej Akademii Nauk*

rok 2017, nr 101, s. 159–172

Anna Barbara GOGOLEWSKA*, Agnieszka MARKOWIAK**

Konwergencja jako wskaźnik zagrożenia sejsmicznego w wybranych polach eksploatacyjnych w KGHM Polska Miedź O/ZG Polkowice-Sieroszowice

Streszczenie: W kopalniach rud miedzi należących do KGHM Polska Miedź podstawowym zagrożeniem naturalnym jest zagrożenie tąpnięciami, którego ograniczanie wymaga odpowiednio dobranych metod oceny jego stanu oraz skuteczności jego zwalczania. Te pierwsze pozwalają określić prawdopodobieństwo wzrostu zagrożenia, a te drugie służą do zapobiegania wystąpieniu jego negatywnych skutków. Dzięki odpowiedniej ocenie stanu zagrożenia, zwiększa się skuteczność jego ograniczania. Jedną z metod bieżącej oceny stanu zagrożenia sejsmicznego jest pomiar konwergencji wyrobisk górniczych. W kopalniach niejednokrotnie stwierdzano, że wzrost konwergencji a także jej zanik, bądź nieregularny przebieg mogą oznaczać wzrost zagrożenia.

Podjęto próbę określenia związku pomiędzy zmianami pionowej liniowej konwergencji wyrobisk a aktywnością sejsmiczną górotworu. Wyniki takiej analizy mogą pozwolić na wstępną weryfikację pionowej konwergencji jako wskaźnika stanu zagrożenia sejsmicznego. Analizę przeprowadzono dla oddziału wydobywczego o wysokiej aktywności sejsmicznej (III stopień zagrożenia tąpnięciami) w kopalni Polkowice-Sieroszowice. W czasie objętym analizą wszystkie zjawiska ze skutkami w wyrobiskach, które wystąpiły w kopalni, miały miejsce w tym oddziale.

Przeprowadzono analizę konwergencji pionowej w okresach wysokiej i niskiej aktywności sejsmicznej. Opisano zmienność średniej 30-dobowej konwergencji pionowej (obliczanej dla ostatnich 30 dni wstecz) i zmiany średniej dobowej konwergencji pionowej. Zwrócono uwagę na skokowe dobowe zmiany konwergencji, nagły jej zanik oraz na jej średnią 30-dobową. Obliczono skuteczność aktywnej i technologicznej profilaktyki tąpniowej. Określono związek między zmianami konwergencji i energią sejsmiczną oraz skutecznością metod profilaktyki tąpniowej poprzez obliczenie współczynników korelacji liniowej.

Słowa kluczowe: podziemne górnictwo rud miedzi, konwergencja wyrobisk górniczych, zagrożenie sejsmiczne, profilaktyka tąpniowa

* Dr inż., ** Inż., Politechnika Wroclawska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii; e-mail: anna.gogolewska@pwr.edu.pl, agnieszkamarkowiakk@gmail.com

Convergence as a seismic hazard indicator in selected mining panels in the KGHM Polish Copper JSC Polkowice-Sieroszowice mine

Abstract: In copper ore mines owned by KGHM Polish Copper JSC the primary natural hazard makes the risk of rock bursts, whose limitation requires appropriately selected methods to assess its state and the effectiveness of combating it. The first of the methods allows you to determine the probability of an increase in the seismic hazard, and the latter is used to prevent the occurrence of its negative effects. When the state of the threat is properly assessed, the effectiveness of its mitigation increases. One of the methods of the current assessment of the seismic hazard is the measurement of the convergence of mining workings, i.e. their squeezing. In mines, it has often been argued that the increase in the convergence as well as its disappearance or irregular course may indicate an increase in risk.

An attempt to determine the relationship between changes in the vertical linear convergence of excavations and seismic activity of rock mass was made. The results of such an analysis may allow for initial verification of vertical linear convergence as an indicator of seismic hazard status. The analysis was carried out for the mining division of high seismic activity (III degree of rock-burst hazard) in the Polkowice-Sieroszowice mine. At the time embraced by the analysis, all rock bursts that occurred in the mine took place in this division.

The analysis of the convergence in periods of high and low seismic activity was carried out. The variability of the 30-day average vertical convergence (calculated for the last 30 days) and the change in the 24-hour average vertical convergence were described. Attention was drawn to the high changes of the day-to-day convergence, its sudden disappearance, and its 30-day average. The effectiveness of active and technological methods of seismic hazard prevention was calculated. The relationship between the changes in vertical linear convergence and the seismic energy as well as the effectiveness of the rockburst prevention were determined by calculating the linear correlation coefficients.

Keywords: copper ore underground mining, seismic hazard, convergence of mining excavation, rock burst prevention

Wprowadzenie

W kopalniach rud miedzi należących do KGHM Polska Miedź występuje szereg zagrożeń naturalnych. Jednym z podstawowych jest zagrożenie sejsmiczne i tąpnięciami. Zagrożenie to wynika między innymi z dużej głębokości zalegania złoża, a co za tym idzie – dużego ciśnienia pierwotnego górotworu i warunków geologiczno-górnictwowych panujących w otoczeniu złoża. W celu zapobiegania zagrożeniom sejsmicznym i tąpnięciami stosuje się odpowiednio dobrane metody oceny stanu zagrożenia tąpnięciami oraz metody profilaktyki tąpniowej (Butra 2010). Dobrze wykonana ocena stanu zagrożenia ułatwia jego zwalczanie. Jedną z metod bieżącej oceny stanu zagrożenia sejsmicznego i tąpnięciami jest pomiar konwergencji wyrobisk górniczych. Pomiary konwergencji, prowadzone w kopalniach, pozwalają określać szybkość zaciskania się wyrobisk górniczych. Definiowana jest konwergencja liniowa (pionowa lub pozioma), powierzchniowa oraz objętościowa. W polskich kopalniach rud miedzi mierzona jest konwergencja pionowa. Doświadczenia pokazują, że zmiany konwergencji mogą świadczyć o podwyższonym stanie zagrożenia tąpnięciami (Marcak 2012). Pojawiła się potrzeba zweryfikowania możliwości wykorzystania pionowej konwergencji jako wskaźnika zagrożenia sejsmicznego.

W artykule podjęto próbę określenia związku między wynikami pomiarów pionowej liniowej konwergencji i aktywnością sejsmiczną oraz skutecznością profilaktyki tąpniowej w wybranym oddziale wydobywczym w kopalni Polkowice-Sieroszowice. Analizie poddano oddział G-23 (cztery pola eksploatacyjne C, D, G, I), w którym roboty górnicze były prowadzone w III stopniu zagrożenia tąpnięciami. Okres analizy to czas od 01.01.2014

do 30.06.2016 (30 miesięcy). W tym czasie wszystkie zjawiska dynamiczne ze skutkami w wyrobiskach (tąpnięcia i odprężenia) w kopalni wystąpiły w tym oddziale. Wyniki tego typu analizy umożliwiły wstępne zweryfikowanie przydatności pionowej konwergencji do prognozowania zagrożenia sejsmicznego. Opracowano wyniki pomiarów konwergencji dobowej i 30-dobowej. Obliczono skuteczność aktywnych i technologicznych metod profilaktycznych. Obliczono współczynnik korelacji liniowej pomiędzy zmianami konwergencji a energią sejsmiczną oraz skutecznością zabiegów profilaktycznych. Określono związek anomalii konwergencji z podwyższoną lub obniżoną aktywnością sejsmiczną. Przeprowadzono również analizę pionowej konwergencji wyrobisk górniczych w odniesieniu do aktywności sejsmicznej.

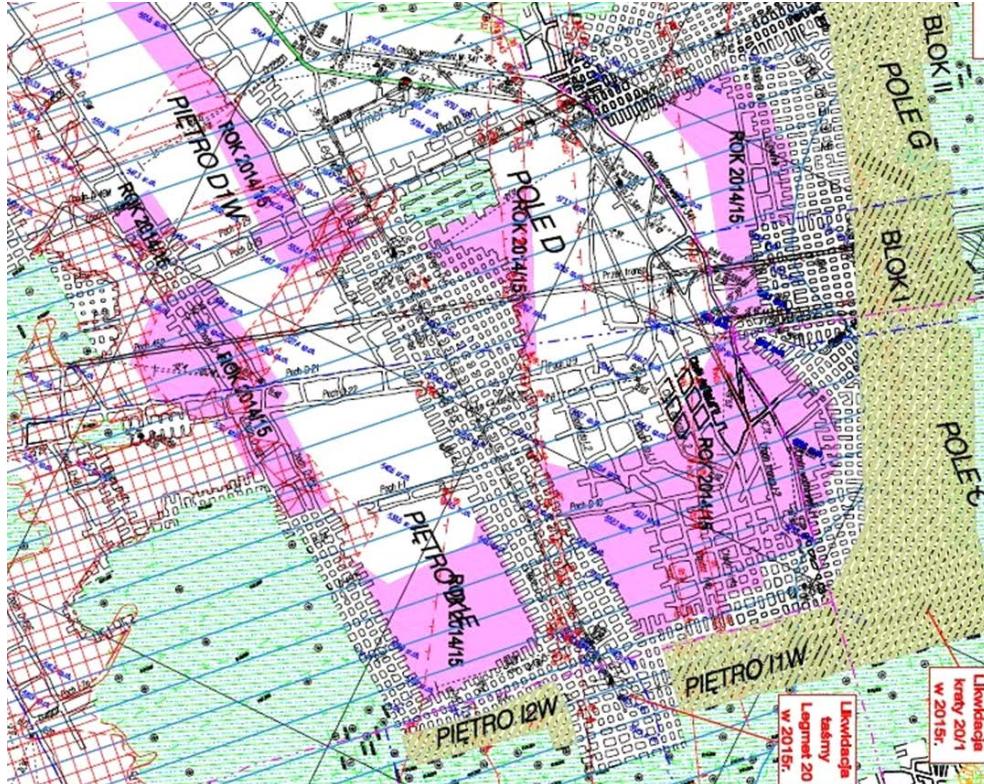
Artykuł został napisany na podstawie fragmentów pracy dyplomowej inżynierskiej zrealizowanej przez Agnieszkę Markowiak pod kierunkiem dr inż. Anny Barbary Gogolewskiej w roku 2017 na Wydziale Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej (Markowiak 2017).

1. Charakterystyka obszaru badań

Pola eksploatacyjne C, D, G i I oddziału G-23 znajdują się w południowej części kopalni Polkowice-Sieroszowice (rys. 1). Idąc od wschodu, jako pierwsze wydzielone jest pole G i następnie znajdujące się pod nim pole C, od strony zachodniej przylega do nich pole D, które zajmuje dość duży obszar; pole I znajduje się najbardziej na południu i jest wydłużone w kierunku równoleżnikowym. W obrębie wszystkich rozpatrywanych pól złoża bilansowe zalega w spągu skał węglanowych cechsztynu i w stropie piaskowców czerwonego spągowca. Występują w nich miejsca charakteryzujące się brakiem okruszcowania (strefy bezzłożowe i bezłupkowe) (KGHM Polska Miedź SA 2013).

Złoże bilansowe w oddziale G-23 obejmuje następujące skały: piaskowce szare, dolomit graniczny, łupek miedzionośny, dolomit ilasty, dolomit smugowany, dolomit wapnisty i dolomit laminowany oraz dolomit organogeniczny. Sumaryczna miąższość złoża bilansowego wynosi od 2,0 do 7,0 m (w tym do 4,4 m piaskowca). Miąższość serii węglanowej cechsztynu waha się od 70 do 80 m. Złoże wybierane jest systemem komorowo-filarowym z ugięciem stropu (J-UG-PS). Zagrożeniem naturalnym wiodącym w tych polach jest zagrożenie tąpnięciami. Roboty górnicze prowadzone są w III stopniu tego zagrożenia przy występującej zmienności parametrów wytrzymałościowych skał furty, stropu i spągu. Głębokość zalegania złoża w polu G wynosi od 742 do 819 m, w polu I waha się od 647 do 719 m, w polu D zmienia się od 659 do 689 m, a w polu C wynosi od 720 do 790 m. Zagrożenie tąpnięciami w fazie projektowania należy uznawać tu za wysokie, ponieważ w przeszłości podczas eksploatacji występowały liczne tąpnięcia. Na przykład w polu C w 1999 roku wystąpił wstrząs o energii $2,9 \cdot 10^8$ J połączony z tąpnięciem, a w polu D w 2005 roku wystąpił wstrząs o energii $1,4 \cdot 10^8$ J połączony z odprężeniem (KGHM Polska Miedź SA 2013).

W oddziale G-23 stosuje się profilaktykę tąpaniową obejmującą: ocenę stanu górotworu, metody technologiczne, organizacyjno-techniczne i aktywne zwalczania zagrożenia. Wszystkie działania mają utrzymać ruch ludzi i sprzętu w strefach upodatkowanego i odprę-



Rys. 1. Szkic wyrobisk górniczych w oddziale G-23 w kopalni Polkowice-Sieroszowice stan na lata 2014–2015 (według Działu Tępań Kopalni Polkowice-Sieroszowice)
 znaczenie kolorów na rysunku: różowy oznacza rozcinkę w latach 2014–2015, oliwkowy oznacza likwidację w latach 2014–2015

Fig. 1. Mining excavations in G-23 division in Polkowice-Sieroszowice mine over the period of 2014–2015 (after Rockburst Department of Polkowice-Sieroszowice mine)
 meaning of colors in the figure: pink means development in 2014–2015, olive means liquidation in 2014–2015

żonego górotworu (Dubiński i Konopko 2000; Butra 2010). Bardziej dokładne informacje o stanie zagrożenia uzyskuje się prowadząc odpowiednie badania przy zastosowaniu urządzeń pomiarowych. Do oceny stanu górotworu według Butry (2010) służą metody: geologicznego rozpoznania możliwości wystąpienia tąpnięcia, sejsmologii górniczej, rozeznania sytuacji geologicznej w obrębie rejonu prowadzenia robót, pomiarów przejawów ciśnienia wywieranego przez górotwór i obserwacji dołowych. W oddziale G-23 w okresie objętym analizą konwergencji stosowano: pomiary pionowej konwergencji wyrobisk w strefie roboczej frontu min. 3 razy w tygodniu; pomiary wzbudzonej aktywności sejsmoakustycznej po strzelaninach przodków raz na dobę, ciągłą rejestrację aktywności sejsmicznej; analizę wyników badań tomografii pasywnej z częstotliwością nie rzadziej niż raz w miesiącu (KGHM Polska Miedź SA 2013).

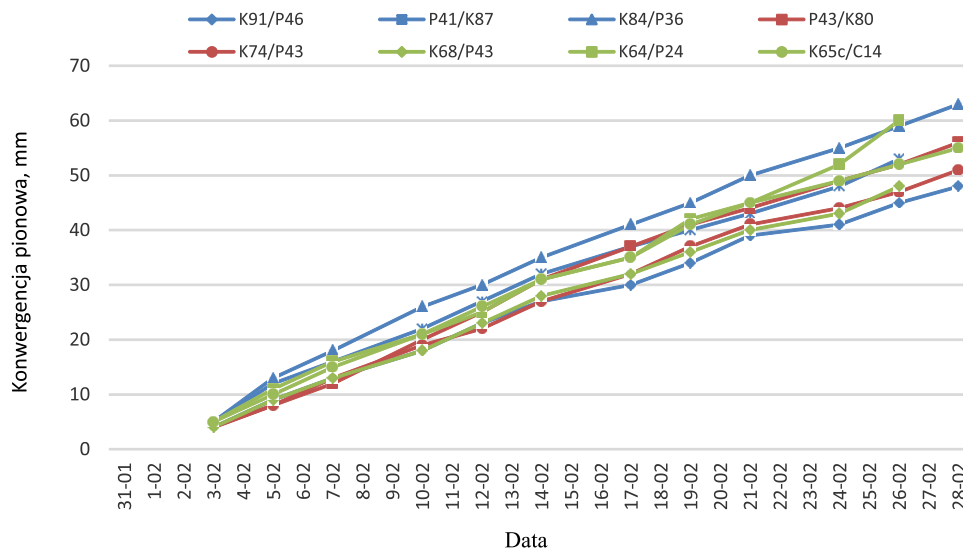
2. Analiza wyników pomiarów pionowej konwergencji w oddziale G-23

Eksploracja narusza pierwotną równowagę w górotworze. Zmienia się pierwotny stan naprężenia i powstaje nowy, który zależy od geomechanicznych właściwości skał, od kształtu i wielkości wyrobiska, pierwotnego stanu naprężenia oraz od liczby i rodzaju sąsiadujących wyrobisk. W trakcie formowania się nowego stanu naprężenia elementy górotworu przechodzą do wewnątrz wyrobiska, co nazywane jest zaciskaniem wyrobiska. Skutkami zaciskania są deformacje, zawały oraz osiadanie powierzchni. Mierzalnym wskaźnikiem zaciskania wyrobisk jest konwergencja, czyli miara zaciskania wyrobiska. Według Kortasa (2001) konwergencja jest to zmiana wymiarów pustki w wyniku jej zaciskania. Konwergencja może być liniowa k (w jednostkach długości), powierzchniowa k_s (w jednostkach pola powierzchni) i objętościowa k_v (w jednostkach objętości) i jest to konwergencja bezwzględna. Konwergencja bezwzględna podzielona odpowiednio przez jednostkę długości, pola powierzchni lub objętości nazywa się względną i wyrażana jest w promilach. Prędkość konwergencji względnej to wartość konwergencji względnej podzielona przez czas, zazwyczaj rok. Prędkość konwergencji liniowej bezwzględnej przedstawiana jest w milimetrach na rok. Dla liniowych konwergencji definiuje się konwergencje główne, które są mierzone wzdłuż kierunków wyznaczonych przez środek wyrobiska prostopadłe do jego ociosów lub spągu i stropu. Konwergencja powierzchniowa opisuje zmniejszanie się pola powierzchni poprzecznego przekroju. Liniowa konwergencja obrazuje zmiany wymiarów liniowych wyrobiska. Przy pomiarze zmiany szerokości wyrobiska mówi się o konwergencji poziomej, a przy pomiarze zmian jego wysokości mówi się o konwergencji pionowej. Określa się ją jako różnicę długości bazy pomiarowej w czasie i podaje w jednostkach długości. Bazą są dwa punkty leżące na przeciwległych ścianach, ociosach albo w stropie i spągu (Kortas 2001, 2012; Marczak 2010). Wielkość konwergencji pionowej określa najczęściej zmianę odległości między dwoma punktami zainstalowanymi w stropie i w spągu podziemnego wyrobiska górniczego. Pomiaru liniowej konwergencji pionowej wyrobisk górniczych są jedną z metod oceny stanu zagrożenia tąpnięciami w kopalni Polkowice-Sieroszowice. Punkty pomiarowe lokalizuje się w linii rozczinki calizny frontu eksploatacyjnego oraz na linii robót likwidacyjnych w równych odstępach. Mierzy się zmiany odległości pomiędzy dwoma punktami, jeden z nich zastabilizowany jest w stropie, a drugi w spągu wyrobiska. Przyrządami są konwergometry, które mają za zadanie zmierzyć odległość między punktami pomiarowymi. Obecnie do pomiaru tej odległości stosowany jest dalmierz laserowy (Bieniasz i in. 2003; Bieniasz i Wojnar 2007) z przymocowanym zaciskiem do mocowania w punkcie (znaku) pomiarowym. Drugi punkt pomiarowy (znak) to tarcza celownicza. W kopalni Polkowice-Sieroszowice pomiary konwergencji są najczęściej wykonywane za pomocą pomiaru laserowego przy użyciu dalmierza (KGHM Polska Miedź SA 2013).

W okresie od 01.01.2014 do 20.06.2016 w oddziale G-23 pomiar pionowej konwergencji wykonywano minimum trzy razy w tygodniu w strefie roboczej frontu, na lewym skrzydle przed strzelaniem przodków i następnie po wykonanych strzelaniach kontynuowano je przez okres jednego tygodnia (trzy pomiary). Analiza objęła zarówno przebieg przyrostu konwergencji w poszczególnych miesiącach, jak i wielkość i zmiany średniej 30-dobowej i na jej

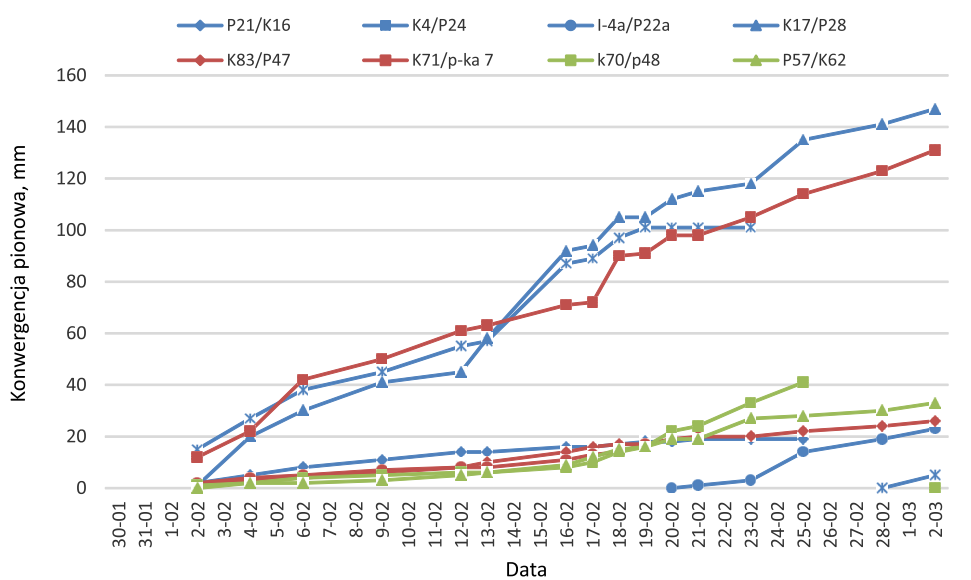
tle zmiany średniej dobowej dla określonych punktów pomiarowych zlokalizowanych na prawym i lewym skrzydle oraz w środkowej części frontu.

Dobowe przyrosty pionowej konwergencji były nierównomierne (przebieg krzywych przyrostu konwergencji). W początkowym okresie analizy, tj. w roku 2014 wyniki pomiarów konwergencji dla poszczególnych punktów pomiarowych nie różniły się znacznie (rys. 2). Jednak od początku 2015 roku następowały duże zmiany między punktami zlokalizowanymi w różnych częściach frontu (rys. 3). Mogło być to spowodowane rozpoczęciem intensywnej eksploatacji w rejonie piętra D1E, gdzie roboty były prowadzone w skrzepowanych warunkach. Dodatkowo ten rejon przejawiał dużą aktywność sejsmiczną. Powolne przyrosty konwergencji występujące od lutego 2015 roku na prawym skrzydle, tj. rejon bloku I i III mogły być wynikiem końcowego etapu rozczinki w tym rejonie, gdzie prowadzono małą liczbę robót i przygotowywano się do zakończenia eksploatacji. W 2016 roku zmiany konwergencji przyjmowały niższe wartości niż w roku 2015. W latach 2014–2016 średnia 30-dobowa liniowej konwergencji pionowej nie charakteryzowała się nagłymi zmianami, była ona bardzo stabilna i przyjmowała bardzo podobne wartości w poszczególnych miesiącach. Nie można tego powiedzieć o średniej dobowej, która była mocno nieregularna i bardzo często występowały skoki jej wartości (rys. 4). Przypuszcza się, że mogła na to mieć wpływ wysoka aktywność sejsmiczna występująca w rejonie oddziału G-23.



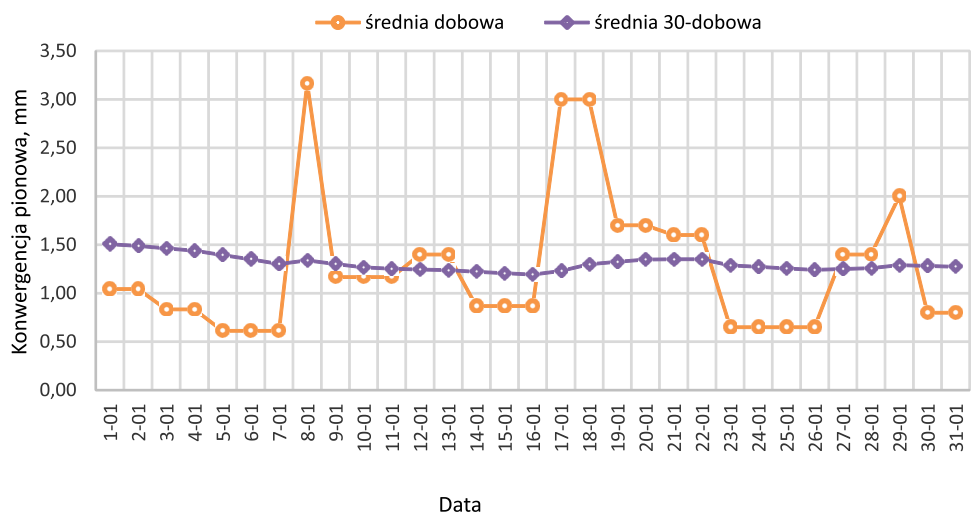
Rys. 2. Zmiany pionowej konwergencji w lutym 2014 roku oddział G-23 (wg Markowiak 2017)

Fig. 2. Vertical convergence in February 2014 in G-23 mining division



Rys. 3. Zmiany pionowej konwergencji w lutym 2015 roku oddział G-23 (wg Markowiak 2017)

Fig. 3. Vertical convergence in February 2015 in G-23 mining division



Rys. 4. Średnia dobowa pionowej konwergencji na tle średniej 30-dobowej w styczniu 2016 roku oddział G-23 (wg Markowiak 2017)

Fig. 4. The 24-hour average vertical convergence related to 30-day average vertical convergence in January 2016 in G-23 mining division

3. Aktywność sejsmiczna

Liczba wstrząsów w roku 2014 wyniosła 723, w roku 2015 – 945 wstrząsów, a w I półroczu 2016 roku – 374 w oddziale G-23. W roku 2014 wystąpiło 59 wstrząsów wysokoenergetycznych (o energii większej od lub równej $1 \cdot 10^5$ J), a w roku 2015 było takich wstrząsów 146, natomiast w I półroczu roku 2016 – 58.

Sumaryczna energia wstrząsów była największa w roku 2015 i wyniosła $1,96 \cdot 10^8$ J. W roku 2014 miała ona wielkość $1,32 \cdot 10^8$ J, a w pierwszej połowie roku 2016 przyjmowała wartość $8,18 \cdot 10^7$ J. Wszystkie wstrząsy ze skutkami w wyrobiskach występujące w kopalni Polkowice-Sieroszowice w latach objętych analizą miały miejsce jedynie w oddziale G-23. W roku 2014 wystąpiło siedem takich zjawisk, z czego pięć było zakwalifikowanych jako odprężenie sprowokowane, natomiast jedno było odprężeniem samoistnym i jedno tąpnięciem samoistnym. W 2015 roku miały miejsce dwa odprężenia samoistne i jedno sprowokowane oraz tąpnięcie sprowokowane. Do połowy czerwca 2016 roku odnotowano dwa odprężenia sprowokowane. W latach 2014–2016 wystąpiło trzynaście zjawisk dynamicznych ze skutkami: w tym dziewięć sprowokowanych i cztery samoistne.

4. Wpływ aktywności sejsmicznej na liniową konwergencję pionową

Podczas przeprowadzania analizy wyników pomiarów konwergencji powinno się zwrócić uwagę na: dobowe skoki konwergencji, nagły jej zanik bądź na zmienność jej średniej 30-dobowej (KGHM 2001). Dla oddziału G-23 obliczono więc korelację liniową pomiędzy aktywnością sejsmiczną wyrażoną energią a właśnie średnią dobową konwergencją pionową. Średnia 30-dobowa nie wykazywała dużych zmian, z tego względu nie wiązano jej z aktywnością sejsmiczną. Nie rejestrowano też dłuższego okresu zaniku konwergencji. Nieregularny przebieg konwergencji bądź jej brak nie musi świadczyć o wzroście zagrożenia ze strony górotworu, ponieważ występują przypadki, dla których jest to charakterystyczne zjawisko. Dzieje się tak w momencie zatrzymania frontu bądź zmniejszenia szerokości otwarcia w polu roboczym. Z tego względu podczas analizowania pomiarów konwergencji należy w szczególności kierować się powiązaniem ich wyników z dotychczasowymi doświadczeniami przebiegu eksploatacji w danym polu (Butra 2010). Spadek konwergencji poniżej 20% średniej 30-dobowej lub wzrost konwergencji, o co najmniej 100% od średniej dobowej, który utrzymuje się przez trzy kolejne doby może świadczyć o wystąpieniu stanu podwyższonego stanu niebezpiecznego zagrożenia tąpnięciami w wyrobiskach górniczych lub ich części. Wyraźny spadek konwergencji lub jej brak, nie zawsze są związane ze wzrostem zagrożenia sejsmicznego, mogą być bowiem rezultatem na przykład zatrzymania rozcinki na froncie roboczym (KGHM Polska Miedź SA 2001).

Analizę korelacji pomiędzy aktywnością sejsmiczną i pionową konwergencją przeprowadzono dla okresów czteromiesięcznych, oddzielnie dla wstrząsów o energii większej od lub równej $1 \cdot 10^3$ J i dla wysokoenergetycznych wstrząsów. Powiązano średnią dobową pionowej konwergencji z energią sejsmiczną tylko w okresach, gdzie widoczna była wyraźna zależność między nimi. Gdy gwałtowny wzrost konwergencji nie objawiał się zwiększoną

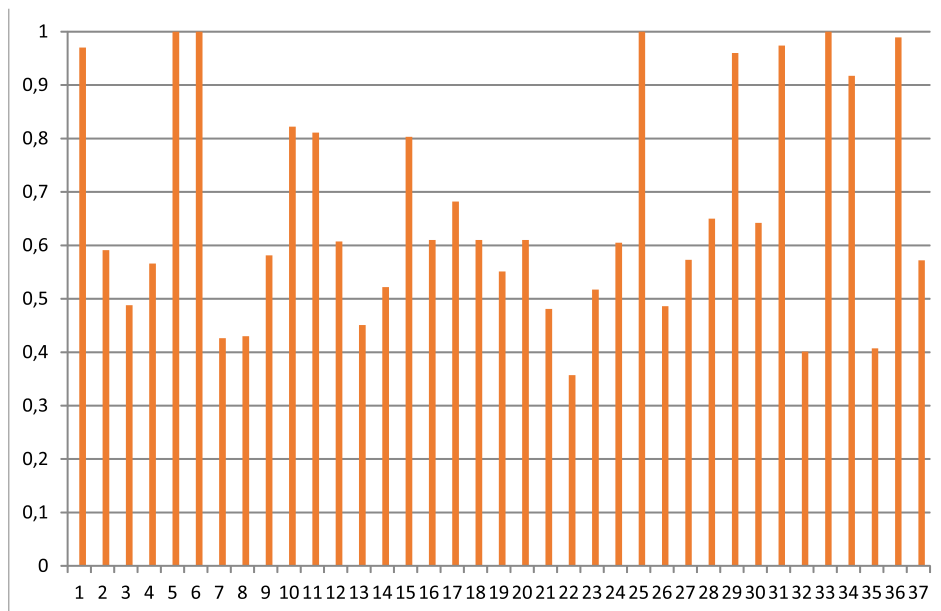
energią sejsmiczną, nie analizowano korelacji. Współczynniki korelacji liniowej pomiędzy energią sejsmiczną i średnią dobową pionowej konwergencji wyrobisk w kolejnych okresach wzmożonej aktywności sejsmicznej w latach 2014–2016 przedstawiono w tabeli 1 i na rysunku 5. Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe powiązanie konwergencji pionowej z energią sejsmiczną dla pierwszych czterech miesięcy 2014 roku. W tym czasie nie występowały znaczne wahania średniej dobowej konwergencji, ale wybrano jeden przykład nagłego wzrostu konwergencji wraz ze zwiększoną energią sejsmiczną. W dniach 3–5.02.2014 roku nastąpił wzrost średniej dobowej konwergencji z 1,5 do 2,75 mm, zarejestrowano w tym czasie także wzrost energii sejsmicznej. Współczynnik korelacji liniowej między średnią dobową konwergencji, a energią wstrząsów wyniósł 0,97, a dla energii emitowanej przez wstrząsy wysokoenergetyczne – 0, ponieważ nie wystąpił wtedy żaden taki wstrząs. W taki sam sposób zilustrowano w trakcie analizy powiązanie konwergencji pionowej z energią sejsmiczną dla roku 2015 i roku 2016. Występowało też wiele takich przypadków, gdzie wzrost konwergencji nie sygnalizował wyraźnego wzrostu energii, jak i okresy, gdzie wzrost energii sejsmicznej następował przy braku wzrostu konwergencji. Wystąpiło 40 przypadków na 53 analizowane, w których zachodziła zależność wprost proporcjonalna pomiędzy konwergencją i energią sejsmiczną. Współczynnik korelacji liniowej wahał się w tych przypadkach od 0,309 (słaba zależność liniowa) do 1 (mocna zależność) (tab. 1).

TABELA 1. Współczynniki korelacji liniowej pomiędzy energią sejsmiczną i średnią dobową pionowej konwergencji wyrobisk w okresach wzmożonej aktywności sejsmicznej w latach 2014–2016 w oddziale G-23 (wg Markowiak zmieniona 2017)

TABLE 1. Linear correlation coefficients between seismic energy and 24-hour average vertical convergence in periods of high seismicity in 2014–2016 in G-23 mining division

Dla wstrząsów o energii $E \geq 1 \cdot 10^3 \text{ J}$						
Rok 2014	3–5.02.	22–27.02.	10–14.03.	17–20.03.	7–13.04	x
Współczynnik korelacji	0,97	0,414	0,591	0,309	0,488	x
Rok 2014	8–13.05.	2–3.06.	13–14.06.	30.06.–3.07.	4–13.08.	x
Współczynnik korelacji	0,566	1	1	0,426	0,43	x
Rok 2014	20–22.08.	29–31.08.	22–27.09.	10–14.11.	1–6.12.	18–25.12.
Współczynnik korelacji	0,588	0,822	0,811	0,608	0,318	0,451
Rok 2015	3.01.–2.02.	12–14.02.	23–28.02.	4–7.03.	23–27.03.	7–10.04.
Współczynnik korelacji	0,522	0,803	0,61	0,682	0,61	0,551
Rok 2015	1–11.05.	8–10.06.	28.06.–3.07.	14–17.07.	20–23.07.	24–25.07.
Współczynnik korelacji	0,57	0,482	0,357	0,517	0,605	1
Rok 2015	30.09–2.10.	6–10.10.	13–15.10.	23–25.10.	23–27.11.	17–19.12.
Współczynnik korelacji	0,486	0,573	0,65	0,96	0,642	0,974
Rok 2016	15–20.02.	2–3.03.	8–9.03.	11–15.04.	15–23.03.	24–27.05.
Współczynnik korelacji	0,401	1	0,917	0,407	0,989	0,572

Współczynniki korelacji liniowej między średnią dobową konwergencji a emisją energii sejsmicznej w 37 kolejnych okresach wzmożonej aktywności sejsmicznej przyjmowały wartości od około 0,357 do 1 (rys. 5). Można na tej podstawie stwierdzić, że zachodził liniowy



Rys. 5. Współczynniki korelacji liniowej pomiędzy energią sejsmiczną i średnią dobową pionowej konwergencji w 37 kolejnych okresach wzmożonej aktywności sejsmicznej w latach 2014–2016 w oddziale G-23

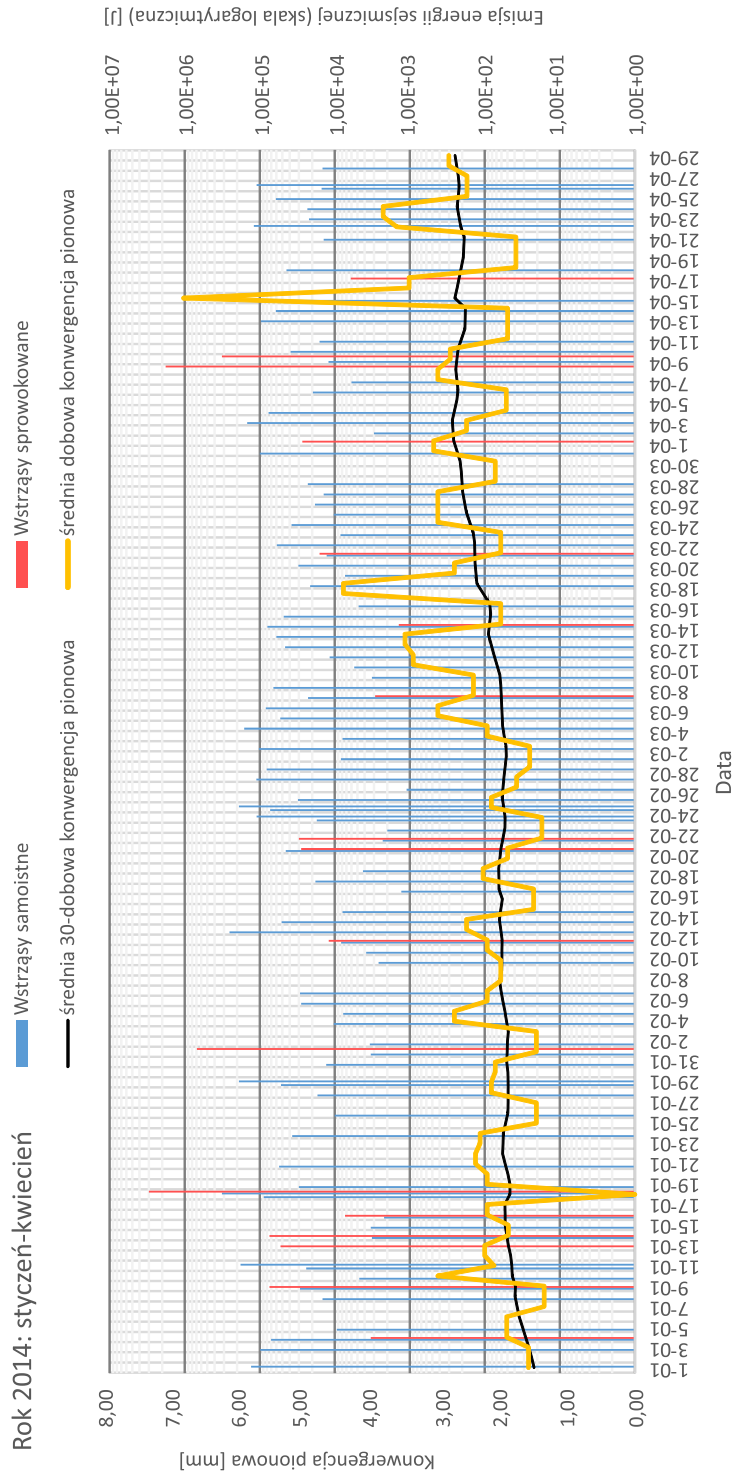
Fig. 5. Linear correlation coefficients between seismic energy and 24-hour average of vertical convergence over 37 subsequent periods of high seismic activity in 2014–2016 in G-23 mining division

wprost proporcjonalny związek między liniową konwergencją pionową i energią sejsmiczną. Nie poddawano obliczeniom korelacji średniej 30-dobowej konwergencji, ponieważ nie zarejestrowano jej znaczących zmian.

Kilka razy zauważono taki liniowy charakter zależności w odniesieniu do zjawisk dynamicznych ze skutkami w wyrobiskach. Zaobserwowano też, że przy anomaliach konwergencji występowały zjawiska sejsmiczne prowokowane robotami strzałowymi, co mogło świadczyć o dobrze dobranej aktywnej profilaktyce tapaniowej.

5. Skuteczność profilaktyki tapaniowej

W oddziale G-23 obliczono udział, jaki samoistne wstrząsy o epicentrach zlokalizowanych: w całości przed rozcinką frontu, w strefie roboczej frontu, w zrobach i poza rejonem czynnego frontu miały w całkowitej liczbie i energii wstrząsów w latach 2014–2016. We wszystkich trzech latach największy udział w energii i liczbie wstrząsów samoistnych miały te o epicentrum zlokalizowanym w strefie roboczej frontu, co było stosunkowo korzystnym zjawiskiem. W 2014 roku wystąpiło tam 78,77%, w 2015 – 80,99% i w 2016 – 72,81% wstrząsów. Energia wówczas wyzwolona na froncie wyniosła 53,22% całej zarejestrowanej



Rys. 6. Średnia 30-dobowa i średnia dobowo pionowej konwergencji na aktywności sejsmicznej w oddziale G-23 w okresie styczeń–kwiecień 2014 roku (wg Markowskiak zmieniomy 2017)

Fig. 6. The 30-day average and 24-hour average of vertical convergence related to seismic activity in the G-23 mining division in January-April 2014

energii, w 2015 – 89,35% i w 2016 – 78,25%. Duży udział w całkowitej energii wstrząsów samoistnych w roku 2014 miały wstrząsy o epicentrach zlokalizowanych przed frontem rozcinki w caliźnie (34,54%), co było bardzo niebezpieczne. W roku 2015 energia w caliźnie miała udział 5,57%, a w 2016 – 2,85%. W każdym roku występowała pewna liczba wstrząsów samoistnych w zrobach. Największy ich udział w odniesieniu do liczby wstrząsów (22%) i energii (ok. 19%) miał miejsce w 2016 roku. Zjawisko występowania wstrząsów w zrobach świadczy o dobrej skuteczności zabiegów technologicznych, które miały na celu przenosić kumulowaną energię w rejon poza obszar, w którym znajdowali się ludzie. Bardzo korzystny, z punktu widzenia profilaktyki tąpaniowej był spadek, z roku na rok, liczby i energii wstrząsów samoistnych, których epicentra były zlokalizowane w caliźnie przed frontem rozcinki.

Prowokowanie wstrząsów ma za zadanie wyładowywanie energii, zanim dojdzie do dużej jej akumulacji w górotworze. W roku 2014 skuteczność prowokowania wstrząsów w odniesieniu do ich liczby wyniosła 21,33%, a w odniesieniu do ich energii 55,58%. W roku 2015 wyniosła ona 64,31% dla liczby wstrząsów, a dla ich energii 66,71%. W I połowie 2016 roku skuteczność prowokowania wstrząsów w odniesieniu do ich liczby wyniosła 39,04%, a w odniesieniu do ich energii – 73,81%. Z roku na rok okresu przeprowadzonej analizy można było zaobserwować wzrost liczby i energii wstrząsów sprowokowanych w stosunku do wstrząsów samoistnych, co było korzystnym zjawiskiem. Szczególnie duży udział wstrząsów sprowokowanych zauważano w odniesieniu do energii. Energia wstrząsów ma większy wpływ na stan zagrożenia tąpnięciami niż ich liczba. Profilaktyka tąpniowa została zatem dobrana do warunków panujących w oddziale G-23 w odpowiedni sposób, gdyż prowokowano minimum 50% całkowitej energii wyładowywanej z górotworu.

6. Skuteczność profilaktyki tąpniowej w powiązaniu z pionową konwergencją

Rozpatrując zmiany pionowej konwergencji w połączeniu z prowokowaniem wstrząsów robotami strzałowymi w oddziale G-23, wybrano dwa okresy, gdzie zaobserwowano związek między tymi parametrami i dwa okresy, które świadczyły o tym, że mimo wzrostu konwergencji wstrząsy nie były skutecznie prowokowane robotami strzałowymi. Okresem w roku 2014, w którym zanotowano silny związek między skutecznością prowokowania wstrząsów a wzrostem średniej dobowej konwergencji był czas od 1 do 3 czerwca. Średnia dobową konwergencji wzrosła wtedy z około 1,5 do 5,6 mm i odnotowano podczas tego wzrostu dwa zjawiska sprowokowane, z czego jedno miało energię rzędu $1 \cdot 10^6$ J i spowodowało odprężenie. Współczynnik korelacji liniowej pomiędzy zmianą konwergencji a energią sprowokowaną robotami strzałowymi wyniósł 0,9999, co pokazuje, że może istnieć wprost proporcjonalna zależność pomiędzy zmianami dobowej konwergencji i wielkością prowokowanej energii sejsmicznej. Ponadto może to świadczyć o dobrze dobranej aktywnej profilaktyce, ponieważ gdyby tak duża energia kumulowana w górotworze, czego obrazem była zmiana konwergencji, nie została wyładowana, mogłoby dość do groźniejszych skutków. Aktywność sejsmiczna spadła po sprowokowaniu tego wstrząsu wraz z konwergencją. Okre-

sem, który wzięto pod uwagę w 2015 roku był czas od 23 do 26 czerwca. Zauważono wtedy związek między wysoką energetyczną skutecznością prowokowania wstrząsów i zmianami konwergencji. Nastąpił skok średniej dobowej od 2,2 do 8,0 mm i jej ponowny spadek do 2,3 mm. Po wzroście konwergencji sprowokowano wstrząs wysokoenergetyczny o energii rzędu $1 \cdot 10^7 \text{J}$, po którym spadła zarówno konwergencja jak i energia sejsmiczna.

Pierwszym rozpatrywanym przypadkiem, gdzie nie dokonano odpowiedniej prowokacji jest wzrost konwergencji z dnia 10 na 11 listopada w 2014 roku, od wielkości około 2,4 mm/dobę do 10,1 mm/dobę. Zarejestrowano wtedy wstrząs samoistny o energii rzędu $1 \cdot 10^7 \text{J}$ oraz inne niskoenergetyczne wstrząsy, a wstrząsy sprowokowane wystąpiły dopiero po wyładowaniu tej dużej ilości energii i spadku konwergencji. Nie zauważono więc tutaj związku skuteczności prowokowania ze wzrostem konwergencji lecz z jej spadkiem. Obliczono też współczynnik korelacji między tymi parametrami i wyniósł on $-0,3443$, czyli zależność była odwrotnie proporcjonalna dosyć słaba. Drugi okres obserwacji to czas od 23 do 27 listopada 2015 roku, gdzie zanotowano wzrost konwergencji od około 0,8 do 4,43 mm/dobę i później jej spadek do około 1,4 mm/dobę. Przy najwyższej wartości konwergencji zarejestrowano wstrząs o energii rzędu $1 \cdot 10^6 \text{J}$, który nie był sprowokowany robotami strzałowymi. W tym okresie tylko jeden wstrząs sprowokowano i miał on energię rzędu $1 \cdot 10^4 \text{J}$. Zaobserwowano, że w niektórych przypadkach bardzo skutecznie prowokowano wstrząsy przy wyraźnym wzroście konwergencji. Zdarzały się jednak też okresy, kiedy przy znacznym wzroście konwergencji wstrząsy o wysokich energiach były samoistne, co mogło wskazywać na nieskuteczną aktywną profilaktykę.

Powiązanie miejsca położenia epicentrum samoistnego wstrząsu z konwergencją pionową wyrobisk w oddziale G-23 oceniono na podstawie wybranych skokowych zmian konwergencji. Określono, które wstrząsy najczęściej towarzyszyły anomaliiom średniej dobowej konwergencji. Większość wstrząsów o znacznych energiach występowała w strefie roboczej frontu przy pojawianiu się wzrostu konwergencji, co z jednej strony jest pozytywne, gdyż nie występują te wstrząsy przed frontem rozcinki, ale z drugiej strony wstrząsy mają miejsce w strefie, gdzie przebywa załoga, która może być zagrożona. Tak więc wzrosty dobowej konwergencji mogą wskazywać na możliwość wystąpienia wstrząsu w strefie frontu roboczego.

Podsumowanie

W wielu analizowanych w artykule przypadkach stwierdzono liniową zależność pomiędzy zmianami pionowej konwergencji, skutecznością prowokowania wstrząsów w odniesieniu do ich energii i energią sejsmiczną. W przypadku, gdy nastąpił nagły wzrost średniej dobowej konwergencji z 1,5 do 2,75 mm, zarejestrowano także wzrost energii sejsmicznej. Współczynnik korelacji między średnią dobową konwergencji, a energią wstrząsów wyniósł wówczas 0,97. W 37 na 53 analizowane okresy wzmożonej aktywności sejsmicznej stwierdzono dosyć wyraźną wprost proporcjonalną zależność pomiędzy pionową korelacją i energią wstrząsów. Współczynniki korelacji dla tej zależności zmieniały się od 0,357 do 1. Zaobserwowano, że anomaliiom konwergencji towarzyszyły zjawiska sejsmiczne prowokowane

robotami strzałowymi, co mogło świadczyć o wysokiej skuteczności aktywnej profilaktyki tąpaniowej. Współczynniki korelacji liniowej między średnią dobową pionową konwergencji a wielkością energii sejsmicznej wyniosły od około 0,357 (dosyć słaba wprost proporcjonalna zależność) do 1 (bardzo mocna wprost proporcjonalna zależność). Można więc stwierdzić, że zależność między pionową konwergencją i energią sejsmiczną była liniowa wprost proporcjonalna o wielkości od słabej do mocnej. Zaobserwowano związek między wysoką energetyczną skutecznością prowokowania wstrząsów i znacznymi zmianami konwergencji. Nastąpił wtedy wzrost średniej dobowej pionowej konwergencji od 2,2 do 8,0 mm a potem spadek do 2,3 mm. Po wzroście konwergencji wystąpił spowodowany wstrząs o energii rzędu $1 \cdot 10^7$ J. Należałoby przeprowadzić analizę zmienności konwergencji w funkcji energii sejsmicznej i skuteczności profilaktyki tąpaniowej dla większej liczby pól eksploatacyjnych i dłuższych okresów eksploatacji. Na tym etapie analiz trudno jest zakwalifikować pionową konwergencję jako jednoznaczny wskaźnik zagrożenia sejsmicznego.

Publikację sfinansowano ze zlecenia statutowego nr 0401/0190/16.

Literatura

- Bieniasz, J. i Wojnar, W. 2007. Zarys historii pomiarów i wybrane wyniki obserwacji zjawiska konwergencji wyrobisk w pokładowych złożach soli. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* 23 (z. spec.), s. 133–142.
- Bieniasz i in. 2003 – Bieniasz, J., Ciągło, W. i Wojnar, W. 2003. Nowa metoda pomiarów deformacji solnej struktury filarowo-komorowej wykorzystująca dalmierz laserowy. *Półrocznik Akademii Górniczo-Hutniczej. Geodezja* 9 (2/1).
- Butra, J. 2010. *Eksploatacja złoża rud miedzi w warunkach zagrożenia tąpniętami i zawałami*. Wrocław: KGHM Cuprum, Sp. z o.o. Centrum Badawczo-Rozwojowe, 436 s.
- Dubiński, J. i Konopko, W. 2000. *Tąpniecie – ocena – prognoza – zwalczanie*. Katowice: Wyd. Głównego Instytutu Górnictwa, 379 s.
- KGHM Polska Miedź S.A., O/ZG Polkowice Sieroszowice. 2013. Projekt Techniczny Eksploatacji Złoża w polu C, D, G, I oddziału G-23 OG Polkowice. Kombinat Górniczo-Hutniczy Miedzi Polska Miedź S.A. Spółka Akcyjna. Kaźmierzów (praca niepublikowana).
- KGHM Polska Miedź SA O/ZG Rudna. 2001. Kryteria oceny stanu zagrożenia tąpniętami wyrobisk górniczych lub ich części w zakładach górniczych wydobywających rudy miedzi. Kombinat Górniczo-Hutniczy Miedzi Polska Miedź S.A. Spółka Akcyjna. Lubin. (praca niepublikowana).
- Kortas, G. 2001. Konwergencja jako miara zaciskania wyrobisk komorowych. *Przegląd Górniczy* nr 6, s. 23–29.
- Kortas, G. 2012. On the convergence of workings and the purpose of working observations in salt mines. *Geology, Geophysics & Environment* 38 (1), s. 51–68.
- Maj, A. 2007. Określenie konwergencji i właściwości lepkich górotworu solnego na przykładzie obserwacji w ZG Polkowice-Sieroszowice. *Przegląd Górniczy* nr 6, s. 25–29.
- Marcak, H. 2012. Seismicity in mines due to roof bending. *Archiwum Górnictwa-Archives of Mining Sciences* 57(1), s. 229–250.
- Marczak, H. 2010. Ocena zaciskania wyrobisk chodnikowych na podstawie pomiarów konwergencji. *Postępy Nauki i Techniki* 4, s. 151–161.
- Markowiak, A. 2017. *Konwergencja jako wskaźnik zagrożenia tąpniętami w wybranych oddziałach wydobywczych w KGHM Polska Miedź S.A. O/ZG Polkowice-Sieroszowice*. Praca inżynierska napisana pod kierunkiem Anny Barbary Gogolewskiej. Wrocław: Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii. (praca niepublikowana).