

Piotr BAŃKA, Andrzej JAWORSKI
Politechnika Śląska, Gliwice

BADANIA WYBRANYCH ASPEKTÓW SEJSMICZNOŚCI TOWARZYSZĄCEJ INTENSYWNEJ EKSPLOATACJI PROWADZONEJ W KWK RYDUŁTOWY

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań mających na celu określenie wpływu parametrów prowadzonych robót górniczych na poziom sejsmiczności indukowanej. Podano wyniki przeprowadzonych obliczeń wpływu prędkości wybierania na ilość i energię wstrząsów. Przeanalizowano rozkłady statystyczne wstrząsów. Zbadano również możliwość opisu zmian poziomu sejsmiczności indukowanej na podstawie analitycznie obliczanych wartości energii odkształcenia sprężystego.

INVESTIGATIONS OF CHOOSEN ASPECTS OF SEISMICITY ACCOMPANYING THE INTENSIVE EXCAVATION IN RYDUŁTOWY MINE

Summary. The paper presents results of works aiming to determine the influence of parameters of mining works on level of induced seismicity. The results of computations of the influence of the velocity of coal faces on number and energy of tremors were presented. Statistical distributions of mining shocks were analysed. The possibility of determination the changes of the level of induced seismicity based on analytically calculated values of specific elastic energy was investigated.

1. Wprowadzenie

Wieloletnie obserwacje wykazały istnienie bezsprzecznych związków pomiędzy niektórymi parametrami górniczymi (np. objętość wybranego złoża, powierzchnia odsłonięcia stropu, układ zaszczości eksploatacyjnych) a poziomem rejestrowanej sejsmiczności. Dotyczy to zarówno ilości występujących zjawisk, jak i ich energii sejsmicznych. Z drugiej strony, poziom sejsmiczności indukowanej, a zwłaszcza skala energetyczna i przestrzenne rozmiesz-

czenie wstrząsów górniczych względem prowadzonych robót istotnie wpływają na zagrożenie tąpnięciami wyrobisk górniczych.

Względy ekonomiczne wymuszają wzrost wydajności. Niejednokrotnie jest to możliwe do osiągnięcia tylko poprzez zwiększenie postępu prowadzonych robót. Z kolei, zmniejszające się obszary czynnych pól eksploatacyjnych, przy konieczności realizowania przez kopalnie określonych planów wydobywania, są powodem prowadzenia jednoczesnego wybierania w sąsiednich pokładach przodkami zlokalizowanymi w niedużej odległości poziomej.

W rejonach zagrożonych sejsmicznie istotnego znaczenia nabiera zagadnienie wpływu wzrostu intensywności eksploatacji na poziom sejsmiczności indukowanej. Problematyka ta jest od lat przedmiotem badań, których rezultaty prowadzą do nieraz kontrowersyjnych wniosków (Biliński A. [1], Gerlach Z. [2], Konopko W. i in.[6]).

Przyczyny utrudniające ustalenie wzajemnych zależności pomiędzy powyższymi wielkościami, to między innymi:

- zmienność warunków geologicznych na wybiegach ścian,
- występowanie zaszczości eksploatacyjnych,
- zmniejszenie postępu wymuszone stosowaną profilaktyką tąpniową.

W warunkach obserwowanego wysokiego poziomu zagrożenia tąpnięciami konieczność stosowania szerokiej gamy metod i środków profilaktyki prowadzi do znaczącego ograniczenia postępu ścian, co na ogół przekreśla możliwość prowadzenia intensywnej eksploatacji.

W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań sejsmiczności indukowanej intensywną eksploatacją pokładów 703/1 i 713/1-2 prowadzoną w KWK Rydułtowy. Eksploatacji tej towarzyszyło bardzo wysokie zagrożenie sejsmiczne, nie spotykane w innych kopalniach węgla kamiennego.

2. Uwarunkowania analizowanych robót górniczych

Eksploatacja górnicza w analizowanym rejonie jest prowadzona od połowy XIX wieku. Objęła ona w tym okresie 12 pokładów: 613/3, 615/1, 616/2, 620/1-2, 624, 626/2, 629/1-2, 630/1-2, 630/2, 703/1, 705/2-3, 713/1-2.

W profilu litologicznym występują trzy grube ławice piaskowca. Ich grubość oraz odległość pionowa od analizowanych robót wynoszą odpowiednio: 70 m w odległości 675 m, 100 m w odległości 490 m oraz 140 m w odległości 280 metrów. Zarówno piaskowce, jak i kompleksy łupków piaszczystych przeławiconych piaskowcami stwarzają potencjalną moż-

liwość emitowania wysokoenergetycznych wstrząsów, szczególnie w rejonach pozostawionych resztek pokładów w sąsiedztwie głównych uskoków.

Zagrożenie sejsmiczne powodowane jest wieloma czynnikami, spośród których do najistotniejszych zalicza się:

- duże naprężenia, wynikające z głębokości eksploatacji, zaszczości eksploatacyjnych (resztki, krawędzie), stosowanych systemów eksploatacyjnych itp.;
- mocne skały otaczające pokład, zwłaszcza grube warstwy piaskowców w stropie pokładu, których załamywanie się powoduje silne wstrząsy,
- skłonność pokładu do tapani; zaburzenia geologiczne (uskoki, ścienienia pokładów), złożo o niejednorodnym zaleganiu wymusza projektowanie eksploatacji z pozostawieniem licznych „wycięć”, co doprowadza do powstawania resztek zdolnych do koncentracji naprężeń,
- zaszczości eksploatacyjne wytworzone w pokładach grupy 600 i 700,
- dużą koncentrację wydobywania, konieczność utrzymania zakładanego dobowego wydobywania przy eksploatacji pokładów o małej (średniej) miąższości (średnia miąższość ok. 2,0 m) wymaga prowadzenia dużej ilości robót przygotowawczych oraz eksploatacyjnych jednocześnie.

W trakcie prowadzenia eksploatacji górniczej w pokładzie 713/1-2 zarejestrowano bardzo dużą liczbę zjawisk sejsmicznych o największych energiach sięgających 10^8 J. Charakterystyczny jest fakt, że nawet najsilniejsze z rejestrowanych wstrząsów nie powodowały wystąpienia skutków w wyrobiskach podziemnych, natomiast były silnie odczuwalne na powierzchni (nawet w odległości 10 km od epicentrum zjawiska). W tabelicy 1 przedstawiono rozkład ilościowy i energetyczny wstrząsów indukowanych analizowanymi robotami prowadzonymi w pokładzie 713/1-2.

Tabela 1

Rozkład ilościowy i energetyczny wstrząsów w latach 2000–2005

Rok	Liczba wstrząsów w klasach						Liczba wstrząsów	Suma energii [J]	Maksymalna energia wstrząsu [J]
	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7			
2000		47	342	22			411	2,75E7	9E5
2001		56	152	9	1		218	1,57E7	3E6
2002		71	93	10	3		179	1,51E7	2E6
2003		92	366	38	13		509	7,93E7	6E6
2004		79	243	41	8	2	374	8,90E7	2E7
2005	1	44	122	21	2		191	4,71E7	2E7
Suma	4		1318	141	27	3	1882	2,74E8	2E7

Na rysunku 1 pokazano kontury analizowanej eksploatacji przeprowadzonej w pokładzie 713/1-2 oraz ogniska wstrząsów o energiach sejsmicznych większych od 1E5 J.



Rys. 1. Eksploatacja w pokładzie 713/1-2 z naniesionymi ogniskami wstrząsów
Fig. 1. Mining in the seam 713/1-2 with marked tremor foci

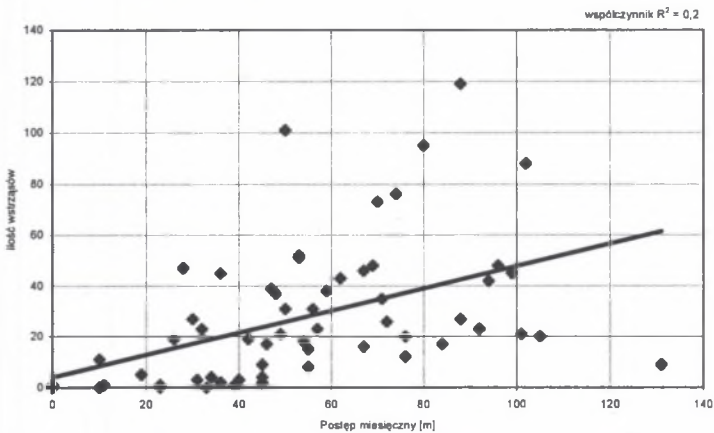
3. Postęp a sejsmiczność indukowana

Badania związku postępu miesięcznego z poziomem sejsmiczności indukowanej wskazują na istnienie zależności sumarycznej energii wstrząsów indukowanych w jednostkowym przedziale czasu od prędkości wybierania. Stwierdzone zależności, z uwagi na zakłócający wpływ wielu innych czynników (nie wszystkich w pełni zidentyfikowanych), są słabe. Niemniej, podkreślenia wymaga, że postęp frontu ścianowego, zwłaszcza dobowy – wprost, odnosząc się do geomechaniki ośrodka skalnego, a także wielu obserwacji, przekłada się na in-

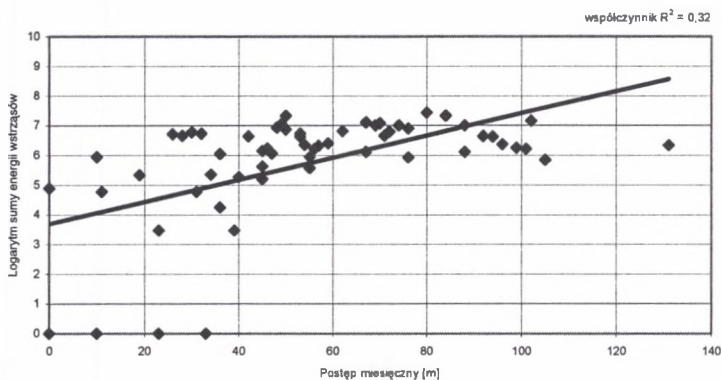
tensywność zachodzących w górotworze procesów deformacyjno-energetycznych. Przekłada się w tym wprost na wielkość jednostkowych (chwilowych) przyrostów kumulowanej w górotworze energii sprężystej, której niewielka część wyzwała się poprzez wstrząsy wysoko-energetyczne.

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono wpływ osiąganych postępów miesięcznych w polach analizowanych ścian na rejestrowane w miesięcznych przedziałach czasu: liczba wstrząsów – rys. 2 i logarytm sumy ich energii – rys. 3.

Wyznaczone wartości współczynnika determinacji wynoszą odpowiednio 0,2 i 0,32. Oznacza to, że 20 % (w przypadku liczby wstrząsów) oraz 32 % (w odniesieniu do logarytmu sumy energii wstrząsów) zmienności rozpatrywanego wskaźnika można tłumaczyć zmianami miesięcznych postępów frontu ścianowego.



Rys. 2. Liczba rejestrowanych wstrząsów w funkcji miesięcznego postępu frontu ścianowego
Fig. 2. Dependence of the number of tremors [1/month] on the advance of longwall front



Rys. 3. Logarytm sumy energii rejestrowanych wstrząsów w funkcji miesięcznego postępu frontu ścianowego
Fig. 3. Dependence of sumary tremors energy [J/month] on the advance of longwall front

4. Ocena zarejestrowanej sejsmiczności metodami statystycznymi

Zastosowanie metod statystycznych do oceny hazardu sejsmicznego w górnictwie wynika z faktu, że obserwacje sejsmologiczne w kopalniach są pod wieloma względami podobne do obserwacji trzęsień ziemi. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że gdy badania ograniczy się do obszaru zlokalizowanego wokół pojedynczego wyrobiska, to różnice między sejsmicznością takiej części górotworu a sejsmicznością obserwowaną w sejsmologii globalnej stają się bardzo istotne. Dotyczy to przede wszystkim postulatu stacjonarności procesu generowania zjawisk sejsmicznych. O danych pochodzących z obszaru związanego z poruszającym się frontem wyrobiska można założyć, że są realizacją tylko odcinkowo stacjonarnego procesu (Lasocki [7]). Mankamentem podejścia statystycznego jest fakt nieuwzględniania istnienia zmiennego w przestrzeni pola naprężeń tektonicznych oraz lokalnych zaburzeń pola naprężeń wynikających z występowania zaszczości eksploatacyjnych.

Estymację parametrów rozkładów i określenie analizowanych wskaźników zagrożenia sejsmicznego (średnich okresów powrotu silnych wstrząsów, maksymalnej energii wstrząsów) przeprowadzono:

- w oknie 30-dniowym, przesuwanym o 15 dni w każdym kroku obliczeń – w przypadku analizy rozkładów wszystkich zarejestrowanych zdarzeń (o energii powyżej 10^4 J),
- w oknie 360-dniowym, przesuwanym o 90 dni w każdym kroku obliczeń – w przypadku analizy rozkładów zdarzeń ekstremalnych, zarejestrowanych w siedmiodniowych przedziałach czasu.

Wyniki analizy przedstawiono na rysunkach 4–6, przy czym kolejne rysunki przedstawiają:

Rys. 4 – Średni okres powrotu wstrząsów o energiach powyżej 10^5 – 10^9 J – rozkład Pareto energii wstrząsów.

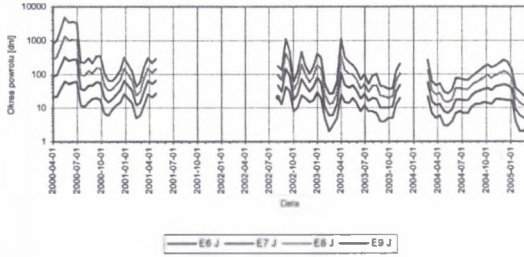
Rys. 5 – Średni okres powrotu wstrząsów o energiach powyżej 10^5 – 10^9 J – III rozkład Gumbela energii wstrząsów.

Rys. 6 – Estymowaną maksymalną energię wstrząsów – III rozkład Gumbela energii wstrząsów.

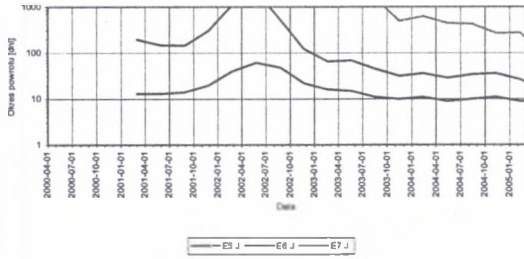
Średnie okresy powrotu wstrząsów określane z wykorzystaniem rozkładu Pareto energii wstrząsów (rys. 4) ulegają częstym dużym zmianom. Świadczy to o silnej niestacjonarności procesu generowania wstrząsów. Zauważalny jest stopniowy wzrost zagrożenia w trakcie rozwoju eksploatacji w polach ścian XI, XII i XIII-W1 w pokładzie 713/1-2. Okresy powrotu

silnych wstrząsów uległy wyraźnemu zmniejszeniu począwszy od 1.01.2005 r. (rys. 4). Zmniejszanie się w okresie ostatnich dwóch lat średnich okresów powrotu stwierdzić można również analizując rozkłady zdarzeń ekstremalnych (rys. 5).

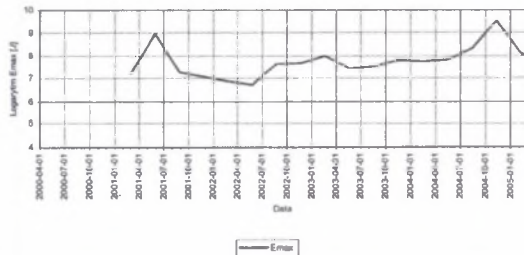
Estymowana maksymalna energia wstrząsów wynosi aktualnie około 10^8 J (rys. 6).



Rys. 4. Okres powrotu wstrząsów o energiach powyżej E6–E9 J. Rozkład Pareto energii wstrząsów; $E_{min}=E4$ J
 Fig. 4. The return period of tremors with energy greater then E6–E9 J. Pareto distribution of energy of tremors; $E_{min}=E4$ J



Rys. 5. Okres powrotu wstrząsów o energiach powyżej E5–E7 J. III rozkład Gumbela energii wstrząsów
 Fig. 5. The return period of tremors with energy greater then E5–E7 J. III Gumbel' distribution of energy of tremors



Rys. 6. Estymowana energia maksymalna wstrząsów. III rozkład Gumbela energii wstrząsów
 Fig. 6. Estimated maximum energy of tremors. III Gumbel distribution of energy of tremors

5. Badania wpływu zmian właściwej energii odkształcenia na poziom sejsmiczności indukowanej w polach ścian XI–XIII W1

W deformowanych robotami górniczymi skałach dochodzi do silnych zmian energii potencjalnej, której jedynie część jest akumulowana w postaci odkształceń odwracalnych i w pewnych ograniczonych obszarach (ogniskach wstrząsów) przechodzi w energię kinetyczną pęknięcia – zniszczenia. Energia uwalniana w procesie niszczenia z obszaru ogniska wstrząsu przewyższa o co najmniej rząd obliczaną ich energię sejsmiczną.

Ilościowy opis przebiegu procesów naprężeniowo-deformacyjnych i przemian energetycznych związanych z dynamicznym niszczeniem określonej objętości skał w odniesieniu do tak złożonego, niejednorodnego ośrodka jak górotwór jest problemem otwartym.

Poszukiwanie więc relacji pomiędzy obliczanymi analitycznie przy idealizacji górotworu rzeczywistego zmianami energii potencjalnej a mierzalną umownie energią sejsmiczną (wielkościami zależnymi od parametrów robót górniczych) w odniesieniu do zastosowań praktycznych jest realne poprzez budowę odpowiednich modeli regresji [4, 5].

Dysponując generowanymi numerycznie tablicami:

- przyrostów $\Delta\phi^+$ i spadków $\Delta\phi^-$ właściwej energii sprężystej w jednostkowych przedziałach czasu Δt (krokach postępu frontu) i dłuższych jego interwałach $\Delta T = n\Delta t$ (odcinkach wybiegu),
 - wartości parametrów charakteryzujących poziom sejsmiczności rejestrowanej w kolejnych przedziałach czasu – etapach rozwoju eksploatacji,
- relację pomiędzy wielkościami obserwowanymi a obliczanymi można wyrazić modelem regresji liniowej

$$\Delta\phi_{obs} = a_1 \sum_{i=1}^n \Delta\phi_{iobl}^+ + a_2 \sum_{i=1}^n \Delta\phi_{iobl}^- + \varepsilon \quad (1)$$

gdzie:

$\Delta\phi_{obs}$ – sejsmiczność zarejestrowana w przedziale czasu $\Delta T = n\Delta t$,

$\sum_{i=1}^n \Delta\phi_{iobl}^-$, $\sum_{i=1}^n \Delta\phi_{iobl}^+$ – obliczane analitycznie dla każdego z punktów siatki obliczeniowej

sumy chwilowych przyrostów bądź spadków właściwej energii sprężystej,

n – liczba przedziałów czasu Δt – jednostkowych kroków postępu frontu ścianowego,

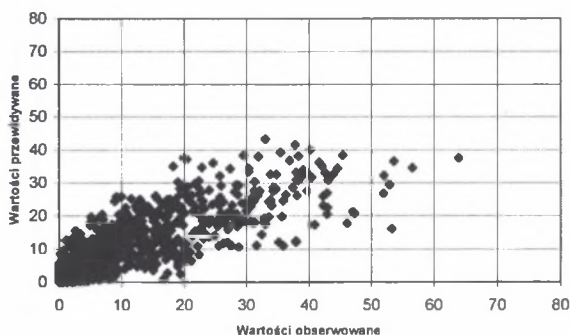
ΔT – porównawczy czasookres obliczeniowy, dla którego wyznaczane są parametry regresji,

ε – składnik losowy

a_1, a_2 – parametry modelu regresji.

Stopień zgodności rozkładu wartości przewidywanych z analogicznymi rozkładami wartości obserwowanych przesądza o celowości wykonywania na podstawie wyznaczonych współczynników regresji prognozy wyprzedzającej w rozpatrywanym rejonie eksploatacyjnym. Prognozę wyprzedzającą każdorazowo musi poprzedzać prognoza porównawcza.

Na rysunku 7 przedstawiono wykres rozkładu wartości przewidywanych dla prognozowanej porównawczo (z wykorzystaniem estymowanego równania regresji) liczebności wstrząsów [$1/10\,000\text{ m}^2$] w rejonie analizowanego rejonu eksploatacji górniczej. Przeprowadzone testy statystyczne wykazały istotność regresji. Przy uwzględnieniu w modelu zmian właściwej energii sprężystej zachodzących w scharakteryzowanych wcześniej warstwach wstrząsogennych, wartość współczynnika determinacji wynosi 0,81. Oznacza to, że 81 % obserwowanej zmienności liczebności wstrząsów można tłumaczyć obliczanymi analitycznie zmianami właściwej energii sprężystej.



Rys. 7. Wykres wartości przewidywanych liczby wstrząsów
Fig. 7. Graph of predicted values of number of tremors

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań sejsmiczności towarzyszącej prowadzonej intensywnej eksploatacji górniczej w KWK Rydułtowy. Zastosowany szereg rutynowo stosowanych od wielu lat metod oceny stanu zagrożenia sejsmicznego (statystycznych, anali-

tycznych prognoz stanów naprężeniowych w górotworze), jak również aktualnie rozwijanych w trakcie prowadzonych badań nowych sposobów prognozowania potencjalnego poziomu zagrożenia sejsmicznego (m.in. wykorzystujących analitycznie określone zmiany właściwej energii sprężystej) pozwolił określić spodziewany stan zagrożenia w trakcie realizacji dalszej eksploatacji w pokładzie 713/1-2. Z uwagi na prognozowany bardzo wysoki jego poziom, kopalnia podjęła decyzję o czasowym zaniechaniu dalszego wybierania złoże w tym rejonie.

LITERATURA

1. Biliński A.: Ocena zagrożenia tąpnięciem wyrobiska eksploatacyjnego. Prace GIG, seria dodatkowa, Katowice 1992.
2. Gil H.: The Theory of Strata Mechanics. PWN, Warszawa 1991.
3. Gerlach Z.: Empiryczne modele przewidywania stanu zwiększonego zagrożenia tąpnięciami w oparciu o wyniki sejsmologii górniczej. Kraków, AGH 1991, praca doktorska (niepublikowana).
4. Jaworski A., Bańka P.: Wpływ robót górniczych na zmiany potencjalnej energii sprężystej w deformowanych warstwach skalnych. Z.N.Pol.Śl. s. Górnictwo z. 253, Gliwice 2002.
5. Jaworski A.: Description of induced seismicity level basing on analytically calculated changes of elastic energy in rock layers subjected to deformation. Acta Geodynamica et Geomaterialia Vol.1, No.1 (133), Prague 2004.
6. Konopko W., Patyńska R., Makówka J. : Postęp, długość i wysokość ścian a zagrożenie tąpnięciami. Prace Naukowe GIG, Komunikat nr 809, Katowice 1995.
7. Lasocki S. : Ocena i prognoza lokalnego ryzyka sejsmicznego poprzez analizę danych sejsmologicznych. Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej. Seria wykłady nr 12, Kraków 1996.

Praca naukowa częściowo finansowana ze środków KBN w latach 2004–2006 jako projekt badawczy.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jerzy Komowski