

Piotr BAŃKA, Andrzej JAWORSKI
Politechnika Śląska, Gliwice

PROBLEMY ZWIĄZANE Z PROGNOZOWANIEM WIELKOŚCI DRGAŃ GRUNTU POWODOWANYCH WYSOKOENERGETYCZNYMI WSTRZĄSAMI GÓROTWORU

Streszczenie. Przedyskutowano wybrane aspekty szacowania wielkości drgań powierzchni wywołanych wstrząsami, indukowanymi eksploatacją górnictwem, prowadzoną w kopalniach GZW. Omówiono problemy związane z określaniem energii najsilniejszych rejestrowanych zjawisk oraz prognozą wielkości i lokalizacji potencjalnych wstrząsów, które mogą wystąpić w trakcie prowadzenia projektowanej eksploatacji. Charakteryzując metody obliczania parametrów drgań gruntu, wywołanych wstrząsami, zwrócono uwagę na konieczność ich okresowej weryfikacji w oparciu o wyniki obserwacji.

PROBLEMS RELATED WITH FORECASTING GROUND MOTION CAUSED HIGH-ENERGY TREMORS

Summary. Chosen aspects of assessment of size of ground motion caused tremors induced by mining works in coal mines in GZW have been discussed. Problems related with estimation of energy of recorded strong tremors and forecast of size and localization of potential tremors which can be induced by planning works have been discussed too. Authors pay attention on necessities of periodic verifications of values of parameters of method for estimation size of ground motion.

1. Wprowadzenie

Sejsmiczność indukowana eksploatacją górnictwem w wielu rejonach wywołuje silnie odczuwalne drgania powierzchni. Na terenach, gdzie stwierdza się wysoki poziom dynamicznych oddziaływań wstrząsów górniczych, tworzone są sieci stanowisk obserwacyjnych. Rosnąca dostępność specjalistycznej aparatury pozwala zwiększać liczbę czujników

w przedmiotowych rejonach. Dysponujemy, więc coraz szerszą liczbą rejestracji parametrów drgań gruntu.

Wyniki tych obserwacji służą do obiektywnej oceny oddziaływania wstrząsów towarzyszących aktualnie prowadzonej eksploatacji, jak również są wykorzystywane do szacowania dynamicznych oddziaływań na powierzchnię potencjalnych wstrząsów prognozowanych dla planowanych robót górniczych. Na podstawie punktowych rejestracji drgań gruntu określa się przybliżony rozkład parametrów tych drgań na całym, objętym wpływami obszarze. Parametry drgań gruntu wyznacza się w oparciu o zależności wiążące energię sejsmiczną wstrząsu i odległość hipocentralną z wybranym parametrem (maksymalna amplituda przyspieszenia, prędkości drgań), charakteryzującym poziom drgań. W przypadku zależności ogólnych, podających wielkość drgań skalnego podłoża, uwzględnia się także wpływ lokalnych własności nadkładu na wielkość drgań powierzchni.

Prognoza wielkości drgań powierzchni obarczona jest znaczącym błędem, spowodowanym:

- niedokładnością określenia energii i lokalizacji rejestrowanych wstrząsów (wykorzystywanych do wyznaczania parametrów zależności empirycznych) oraz prognozowanych dla projektowanych robót,
- silnymi zmianami lokalnych własności nadkładu, który wzmacnia (osłabia) drgania skalnego podłoża.

Autorzy przedyskutowali podstawowe problemy związane z prognozą sejsmiczności indukowanej eksploatacją, jak również z odtwarzaniem rozkładów parametrów drgań powierzchni wywołanych bieżącymi wstrząsami oraz prognozowaniem tych oddziaływań. Wskazano na przybliżony charakter sporządzanych prognoz, szczególnie dla dłuższych okresów czasu – zakresów projektowanej eksploatacji.

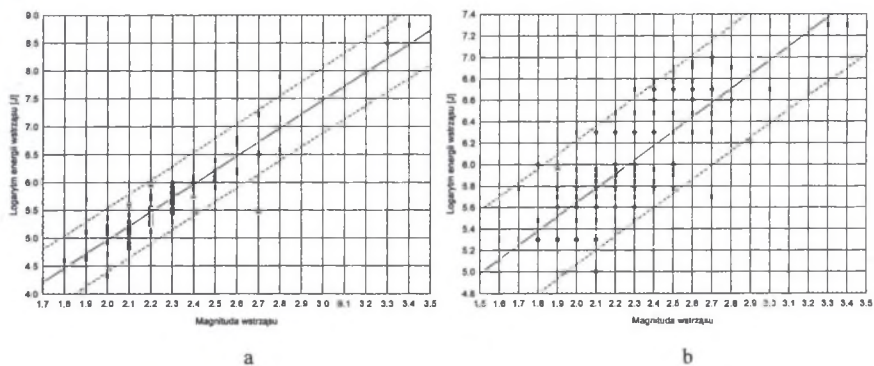
2. Szacowanie wielkości, lokalizacja i czas wystąpienia silnych wstrząsów górniczych

Umowna granica energii sejsmicznej wstrząsów, uznawanych za wysokoenergetyczne wynosi 10^5 J. W praktyce drgania odczuwalne na powierzchni wywołują silniejsze zdarzenia, których energia z reguły przekracza 10^6 J. W przypadku najsilniejszych wstrząsów, kopalniane stacje sejsmologiczne często nie są w stanie poprawnie określić energii sejsmicznej, rejestrowanych zjawisk (ograniczona dynamika aparatury przy konieczności ustawienia wzmocnienia, zapewniającego możliwość rejestracji słabych zjawisk powoduje przesterowanie zapisów

dla najsilniejszych wstrząsów). W przypadku występowania silnych wstrząsów górotworu, powodujących przesterowanie aparatury sejsmologicznej, ich energię, oszacowaną na podstawie własnych zapisów, można weryfikować w oparciu o wartości magnitudy tych wstrząsów, określoną przez Stacje sejsmologiczne PAN lub energię sejsmiczną podaną przez Sieć Regionalną GIG. Możliwe jest stworzenie, dostosowanych do lokalnych warunków, zależności regresyjnych, pozwalających na szacowanie energii silnych wstrząsów górnictwa. Na rys.1a pokazano wyznaczoną, w oparciu o zgromadzony materiał obserwacyjny, zależność magnitudy wstrząsów (M) i ich energii sejsmicznej (E) dla KWK Rydułtowy-Anna Ruch I. Wyznaczone równanie regresji ma postać:

$$\log E = 2,51 M - 0,05 \quad (1)$$

Współczynnik determinacji wynosi 0,84.



Rys. 1. Zależność energii wstrząsów od ich magnitudy – KWK Rydułtowy-Anna Ruch I (naniesione granice 95% przedziału ufności)

Fig. 1. Dependence of energy of tremors from their magnitude – Rydułtowy-Anna Coal Mine - Part I (drawn borders of 95% confidence interval)

Energie sejsmiczne i magnitudy, uwzględnione przy estymacji parametrów równania (1), zostały obliczone przez Śląskie Obserwatorium Sejsmologiczne PAN w Raciborzu. Wykorzystując przy estymacji parametrów równania wartości energii, wyznaczone przez stację kopalnianą dla silnych i bliskich zdarzeń, często (przesterowanie zapisów) z dużym błędem, otrzymuje się nieco inną postać zależności (rys. 1b):

$$\log E = 1,33 M + 2,99 \quad (1a)$$

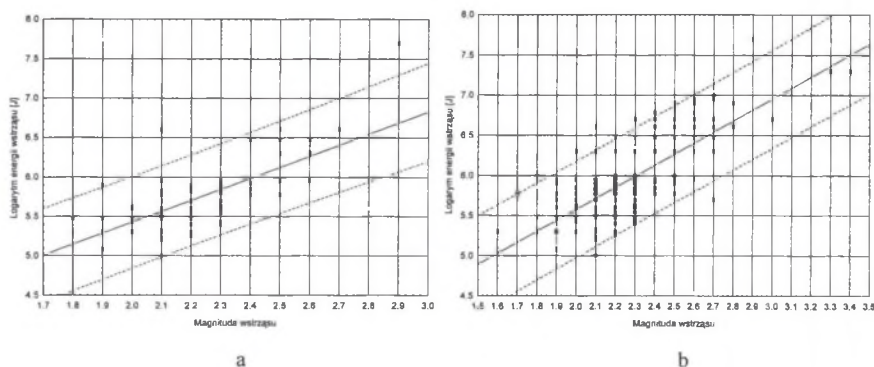
Współczynnik determinacji wynosi 0,55.

Przy odpowiedniej modernizacji aparatury i sieci sejsmologicznej, dzięki dokładniejszemu określaniu energii sejsmicznej wstrząsów, zmniejszeniu uległyby różnice parametrów równań (1) i (1a).

Na rys.2a pokazano analogiczną, jak w przypadku równania (1a), zależność dla Ruchu II kopalni. Wyznaczone równanie regresji ma postać:

$$\log E = 1,4 M + 2,6 \quad (2)$$

Współczynnik determinacji wynosi 0,52.



Rys. 2. Zależność energii wstrząsów od ich magnitudy – KWK Rydułtowy-Anna Ruch II (naniesione granice 95% przedziału ufności)

Fig. 2. Dependence of energy of tremors from their magnitude – Rydułtowy-Anna Coal Mine - Part II (drawn borders of 95% confidence interval)

Uwzględniając łącznie obserwacje z Ruchów I i II (rys.2b) wyznaczone równanie regresji ma postać:

$$\log E = 1,4 M + 2,8 \quad (3)$$

Współczynnik determinacji wynosi 0,53.

Uwzględniając nieco inny zakres (czasokres) obserwacji z Ruchów I i II, wyznaczone przez Z.Pileckiego i in.(2006r.), równanie regresji ma postać:

$$\log E = 1,9 M + 1,9 \quad (4)$$

Powyższe przykłady pokazują, jak silnie zależne są wyniki analizy regresji pomiędzy magnitudą i energią sejsmiczną wstrząsów od zbioru rejestracji, uwzględnianych w obliczeniach.

Mankamentem zależności (4), podobnie jak zależności (1a), (2) i (3), jest wykorzystanie do wyznaczenia parametrów regresji niepewnych dla silnych wstrząsów ocen energii sejsmicznej z zapisów sieci kopalnianej.

Zależności (1), (1a), (2) ustalono na podstawie obserwacji zdarzeń indukowanych w okresie ostatnich 3 lat, w dwóch różnych rejonach – Ruch I i II, co stanowi o ich lokalnym charakterze. Powyższa uwaga odnosi się również do zależności (3) i (4), obowiązujących dla nieco większego obszaru. W kopalniach często do weryfikacji energii najsilniejszych wstrząsów wykorzystywana jest ogólniejsza zależność S.Gibowicza [4]:

$$\log E = 1,9 M + 2,2 \quad (5)$$

Silne zróżnicowanie uwarunkowań górnictwo-geologicznych w aktywnych sejsmicznie rejonach GZW jest powodem wyznaczania równań regresji dla lokalnych obszarów, które okresowo weryfikowane są lepiej dopasowane do wyników obserwacji.

Dokładność określenia energii sejsmicznej rejestrowanych wstrząsów przekłada się wprost na pewność prognozy poziomu zagrożenia sejsmicznego, a w konsekwencji oszacowań oddziaływań wstrząsów górniczych na powierzchnię terenu.

Maksymalną energię wstrząsów indukowanych, mogących wystąpić w trakcie prowadzenia robót górniczych, określa się najczęściej:

- metodą empiryczną – opartą na modelu górotworu naruszonego A. Bilińskiego,
- metodami statystycznymi,
- metodami analitycznymi.

Szacując maksymalną energię potencjalnych wstrząsów można również skorzystać z doświadczeń zdobytych w trakcie prowadzenia eksploatacji w podobnych warunkach geologiczno-górnictwowych.

W metodzie empirycznej [1] prawdopodobna wielkość energii wstrząsów górotworu zależy od wytrzymałości wstrząsogennej warstwy, stopnia usztywnienia górotworu, średniej grubości płyt skalnych w rozsłonej warstwie oraz od odległości warstwy od stropu rozpatrywanego wyrobiska i szeregu empirycznie wyznaczanych współczynników. Niektóre z tych parametrów występują we wzorach podniesione do drugiej i trzeciej potęgi, stąd wynik obliczeń jest silnie zmienny przy nieznaczących zmianach danych wejściowych. Tym niemniej, przy odpowiednim stosowaniu metody możliwe jest oszacowanie rzędu energii prognozowanych wstrząsów. Metodę tę można stosować szczególnie w przypadkach występowania, w trakcie dotychczasowych robót, niskiej aktywności sejsmicznej, co często wynika na przykład z nieznacznego jeszcze otwarcia pola bądź lokalnie „korzystnego układu” zaszczości eksploatacyjnych oraz w przypadkach rozpoczynania eksploatacji w nowych partiach złoża.

Maksymalną energię spodziewanych wstrząsów indukowanych eksploatacją górnictwowa wyznacza się również metodami statystycznymi, adaptowanymi z sejsmologii globalnej. Ma to miejsce, gdy w rejonie analizowanych wybrań rejestrowano uprzednio dostateczną ilość zdarzeń sejsmicznych. Mimo stosowania tych metod do ograniczonych obszarów górotworu, związanych z przemieszczającym się frontem eksploatacyjnym, gdzie proces generowania zjawisk sejsmicznych nie jest w pełni stacjonarny, możliwe jest uzyskanie wiarygodnych prognoz (S. Lasocki [7]). Mankamentem metod statystycznych jest nieuwzględnianie w ocenie zmiennego w przestrzeni pola naprężeń, a więc lokalnych zaburzeń tego pola, wynikłych z występowania zaszczości eksploatacyjnych oraz dyslokacji tektonicznych, a także powodo-

wanych niestabilnością parametrów eksploatacyjnych (postępu, wysokości, długości frontów) rozpatrywanych wybrań.

Kolejną grupę metod stanowią zależności analityczne. Zalicza się do nich metodę opracowaną przez Z.Kłeczka i A.Zorychtę [6]. Autorzy analizując możliwość powstania wstrząsu nad całą, jako kryterium powstania wstrząsu, przyjęli warunek pęknięcia wstrząsogennej warstwy, z kolei w przypadku wstrząsów nad zrobami przyjęli, że są one skutkiem utraty stateczności blokowej struktury, rozważanej warstwy. Uskok został uznany, w stworzonym modelu geomechanicznym, za szczelinę. Znajduje się ona w pewnym stanie naprężenia, w skład którego, oprócz naprężeń pierwotnych, wchodzi również naprężenia wtórne, będące wynikiem wykonania wyrobiska. W tym przypadku nie podano wzoru na określenie energii wstrząsu, a jedynie sformułowano kryterium powstania wstrząsu - w postaci formalnie identycznej jak znane w mechanice zniszczenia warunki propagacji szczeliny.

Prowadzone przez autorów badania [5] wykazały, że istnieją zależności korelacyjne pomiędzy analitycznie opisywanymi procesami deformacyjno-naprężeniowymi i energetycznymi w górotworze, zachodzącymi wskutek prowadzenia eksploatacji a rejestrowanym poziomem sejsmiczności. Zależności te można wykorzystać do szacowania maksymalnych energii wstrząsów indukowanych prowadzonymi robotami górniczymi.

Powyższe metody umożliwiają szacowanie energii zjawisk związanych bezpośrednio z prowadzonymi robotami górniczymi. W przypadku zjawisk o charakterze regionalnym, prognoza staje się bardziej problematyczna. Nie dysponujemy metodami empirycznymi do prognozowania energii tych zjawisk. Z kolei są one z reguły zbyt mało liczne, by móc wykonać ocenę zagrożenia metodami statystycznymi. Zastosowanie metod analitycznych obecnie również wydaje się problematyczne.

Drugim elementem prognozy jest określenie miejsca wystąpienia wstrząsu, co w praktyce sprowadza się do wymiarowania obszarów wzmożonej aktywności sejsmicznej. Silne wstrząsy, indukowane eksploatacją, występują z reguły w rejonie prowadzonych robót górniczych. W przypadku prowadzenia tych robót w skomplikowanej sytuacji górniczej (obecność krawędzi i resztek w pokładach sąsiednich) bądź geologicznej (wymycia, wycienienia pokładu, pokładów sąsiednich, zaburzenia tektoniczne) pomocne w określaniu miejsc prawdopodobnej podwyższonej aktywności sejsmicznej mogą być wyniki pomiarów geofizycznych (np. J.Dubiński [2]). Przy braku wyrobisk umożliwiających dostęp do badanej partii złoża bądź zalegania wstrząsogennych warstw skalnych w dużej odległości pionowej od tych wyrobisk, konieczne jest wykorzystanie metod analitycznych.

Trudniej jest określić prawdopodobną lokalizację wstrząsów wysokoenergetycznych o charakterze regionalnym. Występują one z reguły w sąsiedztwie większych zaburzeń tektonicznych bądź w rejonach, w których przeprowadzenie dokonanej eksploatacji górniczej spowodowało wykształtowanie się szczególnie niekorzystnej sytuacji deformacyjno-naprężeniowej we wstrząsogennych warstwach skalnych.

Do wymiarowania obszarów zagrożonych występowaniem wzmożonej aktywności sejsmicznej wykorzystuje się analitycznie obliczane rozkłady deformacji i naprężeń w potencjalnie wstrząsogennych warstwach skalnych. Otwartym problemem pozostaje wybór najbardziej adekwatnego wskaźnika i jego wartości kryterialnych. Przykładowo funkcje taką może spełniać wskaźnik charakteryzujący zmiany potencjalnej energii sprężystej. Przeprowadzone analizy [5] wskazują na silne zależności sejsmiczności od zmian analitycznie określonej, potencjalnej energii sprężystej (Φ). W procesie niszczenia ośrodka skalnego ta potencjalna energia sprężysta przechodzi w inne, praktycznie niewyznaczalne ilościowo, rodzaje energii, w tym w kinetyczną energię fal sprężystych, utożsamianą z energią sejsmiczną rejestrowanych wstrząsów.

Obliczane zmiany w charakterze rozkładu tej energii, zależne są nie tylko od jej wielkości przed czy po przeprowadzeniu określonej eksploatacji, a uwzględniając jej wartość maksymalną oraz maksymalny jej przyrost w danym czasookresie – mogą być informatywnym parametrem.

Wskaźnik (φ) charakteryzujący zmiany energetyczne, zachodzące w podbieranych eksploatacją piaskowcach, można wyrazić następująco:

$$\varphi = \frac{\Phi_{\max \Delta T} \times \Delta \Phi_{\max \Delta T}}{\Phi_0} = \frac{\Phi_{\max \Delta T} \times (\Phi_{\max \Delta T} - \Phi_{\text{poc}})}{\Phi_0}, \quad (6)$$

gdzie:

$\Phi_{\max \Delta T}$ - maksymalna wartość energii w punkcie P_j w rozpatrywanym przedziale czasu Δ ,

$\Delta \Phi_{\max \Delta T}$ - maksymalny przyrost energii w punkcie P_j w przedziale czasu ΔT_i ,

Φ_{poc} - wartość początkowa energii sprężystej w punkcie P_j przed przeprowadzeniem rozpatrywanego zakresu eksploatacji w czasookresie ΔT_i – poza wpływami eksploatacji

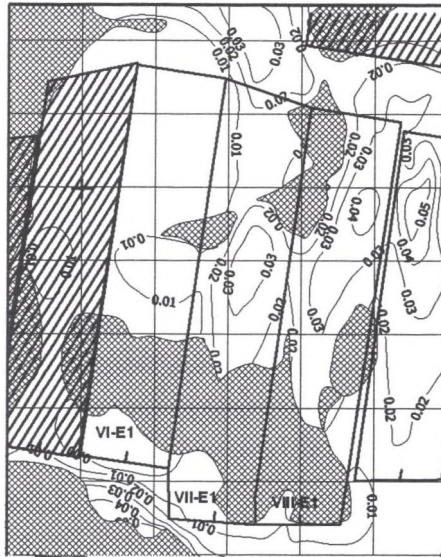
$\Phi_{\text{poc}} = \Phi_0$, natomiast w zasięgu wpływów zaszczości $\Phi_{\text{poc}} \neq \Phi_0$,

Φ_0 - wartość energii sprężystej w górotworze nienaruszonym.

Ograniczenia wynikające z założonej idealizacji ośrodka skalnego sprawiają, że na przykład wskaźnik φ można wykorzystać do wymiarowania obszarów wzmożonej aktywności

sejsmicznej tam, gdzie przed rozpatrywanym czasookresem prowadzenia robót górniczych nie doszło jeszcze do przekroczenia wytrzymałości skał (obliczony wskaźnik wyężenia $W < 1$), natomiast w czasookresie ich prowadzenia proces ten zajdzie (wskaźnik wyężenia wg prognozy $W \geq 1$). Jak wykazały liczne testy numeryczne najlepsze wyniki można uzyskać stosując hipotezę wyężeniową Hoeka – Browna. Określenie wartości kryterialnych wskaźnika ϕ wymaga stosowania metod analizy regresji.

Przykładowo, na rys.3 zwymiarowano obszary wzmózonej aktywności sejsmicznej dla eksploatacji w polach ścian VI-VIII – E1 w pokładzie 703 – Ruch I.



Rys. 3. Obszary wzmózonej aktywności sejsmicznej według rozkładu wskaźnika ϕ w piaskowcu nad pok.629

Fig. 3. Areas of enhanced seismic activities according to distribution values ϕ in the sandstone over the seam 629

Na rys.3 zakreskowano obszary, w których prognozowana wartość wskaźnika wyężenia W jest większa od 1 przed rozpoczęciem eksploatacji w polu ściany VI-E1, względnie pozostaje ona mniejsza od 1 po zakończeniu eksploatacji w polach ścian VI-E1 – VIII-E1 – są to obszary, według prognozy, słabiej zagrożone sejsmicznie. Ponieważ procesy wstrząsotwórcze mogą zachodzić w szeregu warstw skalnych, w celu uzyskania pełniejszej informacji o rejonizacji stref wzmózonej sejsmiczności, należy przeanalizować rozkłady wskaźnika ϕ obliczone dla wszystkich tych warstw.

Kolejnym elementem prognozy jest określenie czasu wystąpienia wstrząsu. Niestety jest to jednocześnie najtrudniejszy jej etap. Praktycznie żadna z rutynowo stosowanych metod oceny zagrożenia sejsmicznego nie daje możliwości oceny czasu wystąpienia zjawiska.

3. Relacje sejsmiczności indukowanej i parametrów drgań gruntu

W pełni obiektywne określanie parametrów drgań powierzchni, wywołanych wstrząsami górniczymi, wymaga prowadzenia ciągłych obserwacji sejsmometrycznych na całym obszarze dynamicznych wpływów eksploatacji. Wymagałoby to takiego zagęszczenia sieci obserwacyjnej, które jest obecnie ze względów technicznych, organizacyjnych, a także ekonomicznych praktycznie niemożliwe. Konieczność określenia wielkości drgań w punktach nieobjętych obserwacją zmusza do stosowania zależności wiążących wielkości wstrząsów, charakteryzowane energią sejsmiczną i odległości epicentralnych (hipocentralne) z maksymalnymi przyspieszeniami (prędkościami) drgań cząsteczek gruntu. W sejsmologii inżynierskiej funkcjonuje szereg zależności wiążących magnitudę lub energię sejsmiczną wstrząsu z maksymalnymi amplitudami przyspieszeń (prędkości) drgań gruntu w obszarze epicentralnym. Tego typu zależności umożliwiają również określenie spadku amplitud drgań z odległością, wskutek tłumienia i pochłaniania fali. Powyższe zależności, weryfikowane w oparciu o wyniki punktowych pomiarów, wykorzystywane są do obliczania parametrów drgań w miejscach nieobjętych obserwacją. Służą one również do szacowania parametrów drgań powierzchni generowanych wstrząsami o prognozowanych energiach (magnitudach).

W KWK Rydułtowy-Anna - Ruch I pomiary przyspieszeń drgań gruntu, wywołanych wstrząsami górniczymi aktualnie prowadzone są za pomocą 2 zestawów aparatury WORS-2 i zainstalowanych w 2005 roku 4 zestawów aparatury Amax. Ponadto, na Ruchu II zainstalowane jest 1 stanowisko pomiarowe. W tabeli 1 przedstawiono zestawienie największych zarejestrowanych, maksymalnych amplitud składowych, poziomych przyspieszeń drgań powierzchni.

Tabela 1

Największe zaobserwowane wartości przyspieszeń drgań gruntu

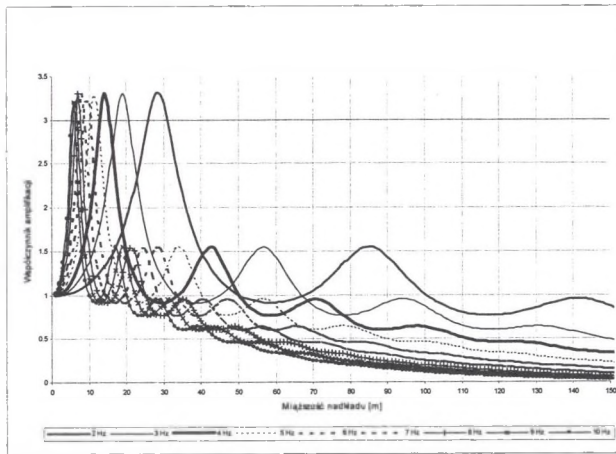
Wstrząs stanowisko	2,4x10 ⁷ J 28.02.2006		7,9x10 ⁷ J 3.04.2006		1,2x10 ⁸ J 13.05.2006	
	Odległość epicentralna [m]	Amax [mm/s ²]	Odległość epicentralna [m]	Amax [mm/s ²]	Odległość epicentralna [m]	Amax [mm/s ²]
Amax 1	2396	150	2126	96	2275	210
Amax 2	1878	250	1570	168	1725	252
Amax 3	293	-	105	668	55	979
Amax 4	1140	532	771	272	884	822
Amax RII	1840	206	1565	145	1581	177
WORS 1	1194	286	1314	66	1444	143
WORS 2	1696	-	1044	133	1016	320

Zwiększona w 2005 roku ilość stanowisk obserwacyjnych pozwala poprawić dokładność odtwarzania pola przyspieszeń drgań gruntu, wywołanych zarejestrowanymi wstrząsami oraz dokładność prognozy, poprzez dobór bardziej adekwatnych do warunków lokalnych wartości parametrów metody prognostycznej. Z uwagi na niestacjonarny charakter obserwowanych procesów, w miarę poszerzania katalogu obserwacji, konieczne jest okresowe weryfikowanie wartości tych parametrów. Mówiąc o pewności prognozy należy podkreślić, że ze względu na stosowanie metody analizy regresji do określania parametrów drgań, mogą wystąpić drgania większe niż prognozowane stosowanym równaniem. Statystycznie dotyczy to 50% obserwacji. Wartości, jakie z zadaniem prawdopodobieństwem nie zostaną przekroczone, określa górna granica przedziału ufności.

Kolejnym elementem powodującym niepewność oszacowań jest zmienność wartości tzw. współczynnika amplifikacji drgań, zależnego od warunków lokalnych. Warunki gruntowe miejsca obserwacji mają istotny wpływ na obserwowane wartości przyspieszeń i prędkości drgań gruntu. Przypowierzchniowe warstwy nadkładu wpływają dwójako na poziom drgań gruntu. Powodują one zwiększone tłumienie drgań, a jednocześnie ich wzmocnienie, na skutek efektów rezonansowych. W przypadku występowania cienkich warstw nadkładu, efekt wzmocnienia drgań dominuje nad efektem tłumienia. Dodatkowo, obecność cienkiej warstwy nadkładu wpływa nie tylko na amplitudy drgań, ale również na ich częstotliwość, odfiltrując drgania o wysokich częstotliwościach. Zawodnienie warstw przypowierzchniowych może również znacznie zwiększać intensywność drgań gruntu. Kolejnym, istotnym elementem decydującym o warunkach propagacji fal, jest ukształtowanie terenu. W przypadku nieregularnych powierzchni występuje złożone zjawisko interferencji fal rozproszonych. Powoduje to lokalne wzmocnienie bądź osłabienie amplitud drgań gruntu, w stosunku do powierzchni płaskiej. Wzmocnienie amplitudy drgań gruntu występuje głównie na szczytach wzgórz i brzegach depresji, osłabienie zaś w okolicy brzegów wzniesienia i dole depresji.

W przypadku braku pomiarów sejsmometrycznych bądź wykonania ich w zbyt małej ilości punktów, konieczne jest wykorzystanie metod analitycznych lub numerycznych [9]. Z uwagi na fakt, że stosowanie metod numerycznych wymaga dokładnej znajomości parametrów fizycznych warstw nadkładu, częściej stosowane są proste modele analityczne.

W celu oszacowania wartości współczynnika amplifikacji drgań gruntu autorzy wykorzystują rozwiązanie równania falowego dla ośrodka sprężystego z tłumieniem (zgodnie z reologicznym modelem Kelvina) – [11]. Dla KWK Rydułtowy-Anna – Ruch I wyznaczone wartości współczynnika amplifikacji wahają się w granicach $0,6 \div 3,2$, silnie zależąc zarówno od miąższości nadkładu, jak i od częstotliwości fali. Ich zmienność obrazuje rysunek 4.



Rys. 4. Zmiany wartości współczynnika amplifikacji drgań w zależności od częstotliwości drgań i miąższości nadkładu

Fig. 4. Changes of values of the amplification depending on frequency of the wave and thickness of the subsoil

Z uwagi na większe grubości nadkładu na przeważającym obszarze Ruchu II wartości współczynnika amplifikacji są mało zmienne, bliskie 1.

Najczęściej do oszacowań wpływów sejsmicznych na powierzchni terenu wykorzystywane są wzory G.Mutke [10], pozwalające określić maksymalne amplitudy przyspieszeń drgań skalnego podłoża, wywołanych wstrząsami o określonej energii i odległości epicentralnej. Maksymalne amplitudy przyspieszeń drgań skalnego podłoża, wywołanych wstrząsami górnicyzmi o energiach E od 2×10^5 J do 5×10^8 J, wynoszą:

$$a_{\max} = [1,33 \cdot 10^{-3} (\log E)^{2,66} - 0,089] \cdot [1,53 \cdot R^{0,155} \exp(-0,65R) + 0,014] , \quad (7)$$

gdzie:

a_{\max} – maksymalne amplitudy przyspieszenia drgań podłoża skalnego (do 10 Hz) [m/s²],

E – energia sejsmiczna wstrząsu [J],

R – odległość hipocentralna [km],

$$R = \sqrt{D^2 + 0,5^2} ,$$

D – odległość epicentralna [km].

Na nieuniknione błędy oszacowania parametrów drgań wpływ mają błędy kolejnych etapów wykonywania oceny: wartości współczynnika amplifikacji, jak również wynikające z przybliżonego charakteru relacji (7). Ocena ta została opracowana w oparciu na wynikach wycinko-

wych badań, prowadzonych w obszarach szeregu kopalń GZW.

W sytuacji, gdy dysponuje się odpowiednio bogatym zbiorem obserwacji przyspieszeń (prędkości) drgań gruntu z danego – lokalnego obszaru, możliwe jest wyznaczenie parametrów modelu regresji przyspieszeń (prędkości) drgań względem energii sejsmicznych i odległości epicentralnych wstrząsów, towarzyszących eksploatacji prowadzonej w tym obszarze. Sposób ten może pozwolić na uzyskanie dokładniejszych oszacowań. Korzystając z metod statystycznych można również (w tym przypadku) określić błędy oszacowań. W najprostszym modelu [8] logarytm, np. maksymalnej amplitudy składowej poziomej przyspieszenia drgań, określa poniższe wyrażenie:

$$\log a = a_1 \log E + a_2 R + a_3 \log R + \varepsilon \quad (8)$$

gdzie:

a – maksymalna amplituda składowej poziomej przyspieszenia drgań gruntu [m/s^2],

E – energia sejsmiczna wstrząsu [J],

R – odległość epicentralna [m],

a_i – parametry modelu regresji,

ε – składnik losowy.

Nieuwzględnienie amplifikacji drgań przez podłoże (zmian współczynnika amplifikacji) powoduje zwiększenie wartości składnika losowego – a co jest z tym związane – błędów prognozy.

Poniżej przedstawiono wyniki estymacji parametrów, zastosowanego modelu regresji. Przeprowadzono ją odrębnie dla rejestracji prowadzonych przez wcześniej scharakteryzowany zestaw sześciu stanowisk – Ruch I oraz dla obserwacji prowadzonych przy pomocy jednego stanowiska – Ruch II.

Jak wynika z obliczeń dla danych z Ruchu I (tabela 2), parametr $\log R$ jest nieistotny, to znaczy może być pominięty (na podstawie wykorzystywanego do estymacji zbioru danych).

Z obliczeń dla danych z Ruchu II wynika, że parametry zależne od odległości epicentralnej są nieistotne. Oznacza to, że nie jest możliwe uwzględnienie w wyznaczonym równaniu regresji oczywistego faktu spadku amplitudy drgań, w miarę wzrostu odległości od ogniska wstrząsu.

Tabela 2

Wyniki estymacji parametrów modelu regresji – Ruch I

R=0.86 R ² =0.74 Skorygowane R ² =0.73 F(3,110)=104.05 p=0.000000 błąd standardowy estymacji 0.23				
Ilość obserwacji : 114	B	Błąd st.	t(110)	poziom p
Wyraz wolny	-1.89712	0.476263	-3.98335	0.000122
log eng	0.56518	0.035475	15.93205	0.000000
log r	0.16529	0.160115	1.03230	0.304197
r	-0.00040	0.000086	-4.65764	0.000009

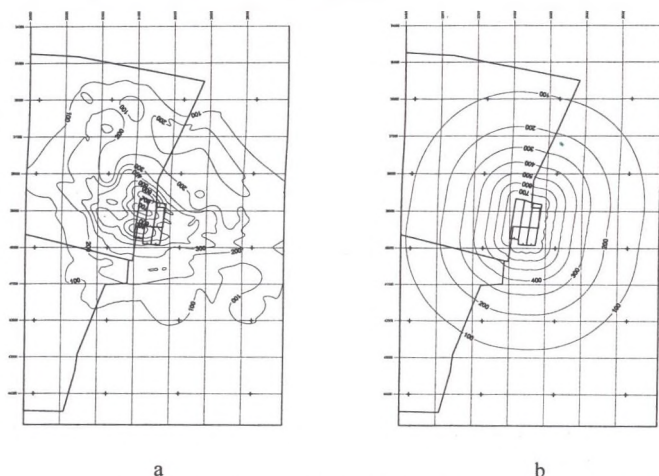
Tabela 3

Wyniki estymacji parametrów modelu regresji – Ruch II

R= 0.76 R ² = 0.57 Skorygowane R ² = 0.57 F(3,571)=256.98 p=0.000000 błąd standardowy estymacji 0.28				
Ilość obserwacji : 575	B	Błąd st.	t(571)	poziom p
W. wolny	-0.241962	0.281318	-0.86010	0.390094
log_eng	0.367495	0.013818	26.59532	0.000000
log_r	-0.050046	0.119880	-0.41747	0.676494
r	-0.000138	0.000086	-1.61063	0.107814

Analizy zmiennych resztowych [3], przeprowadzone dla obu zbiorów danych, nie wykazały istnienia błędów modelu regresji, wymagających jego modyfikacji.

Na rys.5 pokazano wyniki oszacowań maksymalnych amplitud składowej poziomej przyspieszeń drgań gruntu. Rysunek 5a przedstawia wyniki otrzymane przy wykorzystaniu zależności (7). Nieregularny przebieg izolinii przyspieszeń drgań wynika z dużej zmienności analitycznie wyznaczonego współczynnika amplifikacji. Z kolei rys. 5b podaje wyniki oszacowania sporządzonego za pomocą modelu regresji (8).



Rys. 5. Szacowane maksymalne amplitudy składowej poziomej przyspieszeń drgań [mm/s²]
 Fig. 5. Predicted values of maximum amplitude of horizontal acceleration of vibrations [mm/s²]

W przykładowych prognozach, pokazanych na rys.5 wartości przyspieszeń drgań gruntu są znacząco większe od wcześniej prognozowanych dla przedmiotowego obszaru. Jest to następstwem przeprowadzonej weryfikacji parametrów metody prognostycznej. Weryfikacja ta mogła zostać dokonana dzięki znacznemu zwiększeniu się ilości obserwacji i stanowisk aparatury pomiarowej. Istotny wpływ na wskazania prognozy (duże wartości przyspieszeń – rys.5) miały również wzrastające ilość i energia rejestrowanych wstrząsów.

4. Podsumowanie

Wraz z narastaniem w kopalniach zagrożenia sejsmicznego, w tym dynamicznych oddziaływań wysokoenergetycznych wstrząsów na powierzchnię terenu, udoskonalane są metody obserwacji i zwiększana jest ilość stanowisk aparatury pomiarowej. Pozwala to na coraz dokładniejsze określenie parametrów drgań gruntu, wywołanych wstrząsami indukowanymi prowadzoną eksploatacją. Wzrastająca ilość obserwacji umożliwia również aktualizację wartości parametrów stosowanych metod prognostycznych, co przekłada się na zwiększenie dokładności wykonywanej prognozy parametrów drgań powierzchni. Nadal jednak, co wynika z omawianych wyżej problemów, prognozy takie, zwłaszcza długoterminowe, są obciążone znaczącym błędem i wymagają okresowej weryfikacji. W takich przypadkach (dla dużych zakresów i czasokresów eksploatacji) wyniki obliczeń należy traktować jako przybliżoną prognozę - oszacowanie poziomu spodziewanych drgań.

Odrębny, nieporuszany w artykule, problem stanowi ocena oddziaływania drgań o prognozowanych (szacowanych), maksymalnych wielkościach na obiekty powierzchniowe. Obecnie brak jest skali intensywności drgań, dostosowanej do specyfiki sejsmiczności GZW. Stosowane dotychczas skale MSK-64 i SWD dają często zawyżone oceny szkodliwości drgań w stosunku do obserwowanych, co podważa ich przydatność.

LITERATURA

1. Biliński A.: Ocena zagrożenia tąpnięciem wyrobiska eksploatacyjnego. Prace GIG, Seria dodatkowa, Katowice 1992.
2. Dubiński J.: Sejsmiczna metoda wyprzedzającej oceny zagrożenia wstrząsami górnictwami w kopalniach węgla kamiennego. Prace GIG, Seria dodatkowa, Katowice 1989.
3. Draper N.R., Smith H.: Analiza regresji stosowana. PWN, Warszawa 1973.

4. Gibowicz S.: Klasyfikacja Energetyczna wstrząsów podziemnych na Górnym Śląsku i częstotliwość ich wstępowania w zależności od wielkości energii. Arch. Górn. 7, Kraków 1963.
5. Jaworski A., Bańka P.: Wykorzystanie wyników analitycznych prognoz zmian w stanie naprężeniowo-deformacyjnym i energetycznym górotworu do oceny potencjalnego zagrożenia wstrząsami i tapaniami wyrobisk. X Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Tapania 2003, Katowice 2003.
6. Kłeczek Z., Zorychta A.: Geomechaniczne warunki powstawania wstrząsów górniczych. Mat.III Krajowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Zastosowanie metod geofizycznych w górnictwie kopalni stałych”, Jaworze 1991.
7. Lasocki S.: Ocena i prognoza lokalnego ryzyka sejsmicznego poprzez analizę danych sejsmologicznych. Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej. Seria wykłady nr 12, Kraków 1996.
8. Lasocki S., Szubiński M., Matuszyk J., Mirek J., Pielesz A.: Prognozowanie drgań powierzchni wywołanych wstrząsami górniczymi – przegląd krytyczny. Warsztaty 2000 nt.Zagrożenia naturalne w górnictwie, Kraków 2000.
9. Marcak H., Zuberek W.M.: Geofizyka Górnicza. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1994.
10. Mutke G.: Metoda prognozowania parametrów drgań podłoża generowanych wstrząsami górniczymi w obszarze GZW. Praca doktorska (niepublikowana), Katowice 1991.
11. Sawarenski E.F.: Podstawowa ocena wpływu nadkładu na drgania powierzchni ziemi. Izwiestia Akademii Nauk ZSRR, s.Geofizyka 10/1959, Moskwa 1959.

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

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jerzy Kornowski