

Energia emisji sejsmoakustycznej i energii wstrząsów jako podstawa liniowej prognozy zagrożenia sejsmicznego

Kilka lat temu przedstawiono Czytelnikom MiAG (Kornowski, Kurzeja 2004) zwięzły opis tak zwanej liniowej prognozy zagrożenia sejsmicznego, na podstawie rutynowych obserwacji AE i wstrząsów. Niniejszy artykuł opisuje dalszy rozwój tej metody i pomyślany został jako zachęta do jej stosowania. W kolejnych rozdziałach przedstawiono definicje całkowitej energii sejsmicznej oraz zagrożenia sejsmicznego oraz (w zarysie) sposób szacowania energii bez lokalizacji źródeł AE z równoczesną estymacją tłumienia przed frontem ściany. Eksperymentalna eksploatacja metody w bardzo zróżnicowanych warunkach górniczych upoważnia do wniosku, że metoda – choć oczywiście nie zmniejsza zagrożenia ani nie jest rozwiązaniem, które w pełni usatysfakcjonować by mogło górników – działa lepiej od metod obecnie stosowanych, przede wszystkim ograniczając liczbę fałszywych alarmów. Istotną nowością – w porównaniu ze znanymi metodami – jest oparcie prognozy na mierzonej za pomocą aparatury ARES (produkcji EMAG), energii AE (a nie na tak zwanej aktywności), co umożliwia uzyskanie jednoznacznych prognoz.

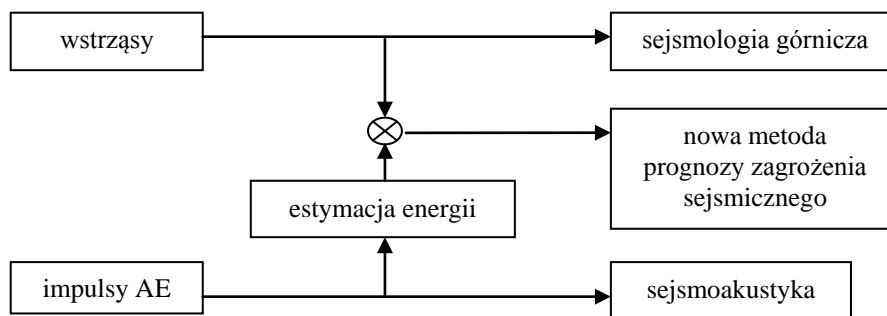
1. WPROWADZENIE

Od wielu dziesięcioleci ocena stanu zagrożenia tąpnięciami jest przedmiotem zainteresowania górników i związanych z górnictwem geofizyków. Równie długo badane i stosowane są różne metody oceny tego zagrożenia, lecz wyniki wciąż są niezadowalające.

Kilka lat temu przedstawiono Czytelnikom MiAG (Kornowski, Kurzeja 2004) zwięzły opis nowej metody prognozowania energii emisji sejsmicznej, rozumianej jako suma energii wstrząsów i zdarzeń sejsmoakustycznych (AE), obserwowanych za pomocą aparatury ARES (produkcji EMAG), w danej ścianie, w kolejnych jednostkach czasu, którymi mogą być, na przykład godziny. Metoda jest prosta i wygodna w tym sensie, że wykorzystuje rutynowe obserwacje AE i wstrząsów, nie wymaga więc od służb tępnięć niczego poza (prostą) obsługą programu komputerowego. Jest też „bezpieczna”, co oznacza, że w żaden sposób nie utrudnia działania metod już istniejących – nie wchodzi więc w kolizję z żadnymi przepisami czy zaleceniami nadzoru górniczego.

W niniejszym artykule, pierwszym z dwuczęściowego cyklu (drugi to Kornowski 2009), nawiązano do poprzedniego tytułu publikacji (Kornowski, Kurzeja, 2004), opisując dalszy rozwój metody, której naukowe podstawy przedstawiono w książce (Kornowski, Kurzeja, 2008). Ponieważ jednym z zasadniczych wymogów metody jest sumowanie energii (AE i wstrząsów) cała kolejna publikacja (Kornowski, 2009) stanowiąca faktycznie drugą część niniejszej, dotyczy zagadnienia estymacji energii AE, przede wszystkim za pomocą najpopularniejszej aparatury sejsmoakustycznej typu ARES.

Przedmiotem zainteresowania jest nowa metoda prognozy zagrożenia sejsmicznego (i stanu tego zagrożenia: definicje podano dalej), która z założenia, działać ma równolegle do metod już istniejących (by uszanować obowiązujące przepisy) i korzystać z informacji rutynowo dostarczanej przez istniejące sieci czujników sejsmologii górniczej i sejsmoakustyki. Przewiduje się znaczną automatyzację nowej metody tak, że operatorzy w kopalnianej stacji tępnięć nie powinni odczuć – po uruchomieniu metody – wzrostu pracochłonności.



Rys. 1. Szkic ilustrujący związek nowej metody prognozy zagrożenia sejsmicznego z dotychczasowymi metodami sejsmologii górnicznej i sejsmoakustyki.
Zauważ, że nowa metoda nie utrudnia działania metod dotychczasowych

By łatwiej wskazać różnice między metodą nową a metodami sejsmologii górnicznej i sejsmoakustyki, które dziś są stosowane, przypomnijmy, że:

- Przedmiotem zainteresowania „metody kompleksowej” i metod składowych jest „ocena stanu zagrożenia tąpnięciami”. Ani w Instrukcji z 1996 r. ani w Instrukcji z 2007 r. słowo „prognoza” się nie pojawia. Oceniane jest zagrożenie minione i zakłada się, że w „najbliższym czasie” pozostanie ono bez zmian. Co ważniejsze, zagrożenie to nie jest w sposób jawny zdefiniowane, a z punktu widzenia fizyki nie jest więc oczywiste, co faktycznie podlega ocenie.
- Metody sejsmologii i sejsmoakustyki działają niezależnie, dając osobne oceny. Co ważniejsze, gdy obserwuje się ścianę za pomocą wielu czujników sejsmoakustycznych to Instrukcje (i z roku 1996 i z roku 2007) powiadają, że o „wynikowej ocenie decyduje geofon wskazujący największe zagrożenie”. Powoduje to zbędny i dokuczliwy nadmiar „fałszywych alarmów”.
- Badane przez metodę sejsmologii ciągi wstrząsów górnicznych pozbawione są istotnej autokorelacji (co, w odniesieniu do „silnych” wstrząsów stwierdził już Lasocki 1990, 1992 i co również wielokrotnie potwierdzali Kornowski i Kurzeja, np. Kornowski i Kurzeja 2008) nie umożliwiają więc nietrywialnej (*) prognozy w dziedzinie czasu. Ciągi wstrząsów niosą jednak informację o „wysokoenergetycznym” skrzydle rozkładu energii. Badane przez metodę sejsmoakustyki ciągi zdarzeń AE (czyli sejsmoakustycznych) cechuje istotna autokorelacja, zatem umożliwiają one nietrywialną prognozę zmian emisji w dziedzinie czasu, lecz (niemal) nie zawierają informacji o energii wstrząsów. Tak więc każda z metod, działając osobno, jest „ułamna”.

– Systemy sejsmoakustyki określają – nie energię (fizyczną) AE, lecz – tak zwaną „energię umowną”, której nie można sumować z energią wstrząsów, a do oceny stanu zagrożenia wykorzystują zazwyczaj tak zwaną „aktywność” AE (która jest liczbą zdarzeń AE w ustalonej jednostce czasu). Aktywność sejsmoakustyczna jest – jak wskazują badania laboratoryjne i teoretyczne – słabiej niż energia AE związana z procesem niszczenia skały.

Celem nowej metody jest usunięcie lub istotne złagodzenie wymienionych wyżej, niekorzystnych aspektów rozpatrywanych metod, a niniejsza publikacja przedstawia stan prac w tym zakresie. Równocześnie jednak nowa metoda w żaden sposób nie wyklucza ani nie utrudnia pracy metod dotychczas stosowanych. Metoda ta pracować ma równolegle z metodami dotychczasowymi, umożliwiając porównywanie wyników i ocenę ich jakości. Szkic pokazujący związek metod pokazano na rys. 1.

2. DEFINICJA ZAGROŻENIA

Rozpoczynając kilka lat temu, prace związane z opracowaniem nowej metody prognozy zagrożenia sejsmicznego uznano, że podstawową usterką metod dotychczasowych, usterką która musi być w pierwszym rzędzie usunięta, jest brak jawnej definicji zagrożenia i jego stanu. Nawet, gdy intuicyjnie pojęcia te są rozumiane, to brak jawnej ilościowej i konstruktywnej definicji naraża na zarzut irracjonalności i subiektywizmu. Nie można też – i zapewne nie będzie można – ilościowo oceniać/prognozować wielkości, które nie posiadają ilościowej, ścisłej definicji.

Ponieważ w wielu dziedzinach i zastosowaniach nauki przyjęto już (co potwierdza ogólnie znana literatura) definicję ryzyka:

* Prognoza trywialna to „prognoza losowa”, „subiektywna” lub „średnia z ostatnich N odstępów czasu”. Prognoza nietrywialna to prognoza uzasadniona naukową teorią.

ryzyko = prawdopodobieństwo „zdarzenia” • strata wywołana „zdarzeniem”

to, aby nawiązać do powszechnie akceptowanych pojęć, a równocześnie ominąć problemy wyceny oraz prognozy strat (które zależą od czynników nieprognozowalnych i „nienaukowych”, jak np. liczba osób w zagrożonym wyrobisku w chwili realizacji zagrożenia), przyjęto (w największym skrócie), że

zagrożenie (sejsmiczne) = prawdopodobieństwo „zdarzenia” sejsmicznego

„Zdarzenie sejsmiczne” nie jest jednak tożsamy ze wstrząsem, gdyż – jak przypomniano powyżej – wstrząsy nie są dziś prognozowane. Zamiast tego „zdarzenie” zdefiniowano jako emisję („istotnej”) energii sejsmicznej w określonym przedziale (Δt) czasu z ustalonego obszaru (S). Formalnie jasne jest, że gdy $\Delta t \rightarrow 0$ to prognoza dotyczy zdarzenia krótkotrwałego (np. wstrząsu), lecz wariancja tej prognozy tak wzrasta, że staje się ona bezużyteczna.

Niech symbol $P\{\cdot\}$ oznacza prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia, przy czym z definicji $0 \leq P\{\cdot\} \leq 1$. Wówczas definiuje się (np. Kornowski i Kurzeja 2008) formalnie, że

Definicja

Zagrożenie sejsmiczne Z^s lub – uwzględniając czas i obszar – **$Z^s[(t, t+\Delta t), S]$ jest to prawdopodobieństwo $Z^s = P\{E^c[(t, t+\Delta t), S] \geq E_g\}$, że całkowita energia sejsmiczna (E^c) wyemitowana w okresie ($t, t+\Delta t$) w obszarze S , przekroczy wartość graniczną E_g („próg bezpieczeństwa”) (*). Zagrożenie Z^s z definicji spełnia nierówność $0 \leq Z^s \leq 1$, zatem przedział ($0 \div 1$) możliwych zagrożeń zawsze podzielić można na odcinki (np.: $0-10^{-5}-10^{-4}-10^{-3}-1$) i nazwać je **stanami zagrożenia sejsmicznego** (np. A, B, C, D).**

Ta ważna definicja zasługuje na pewne wyjaśnienia i uzupełnienia:

A. Definicja ta jest konstruktywna i ilościowa, a zdefiniowane przez nią zagrożenie (i jego stan) zawsze (np. co godzinę) może być – dla danego wyrobiska – łatwo obliczone. Metoda prognozy liniowej – opisana w pracy z 2004 roku (Kornowski, Kurzeja 2004) i będąca przedmiotem niniejszego artykułu – umożliwia sekwencyjne (np. co godzinę, dla najbliższej godziny) obliczanie zarówno wartości średniej ($\log \bar{E}$) jak i wariancji ($\sigma_{\log E}^2$) rozkładu energii w najbliższej nadchodzącej godzinie. Mając obliczoną wartość średnią i wariancję, łatwo obliczyć można dowolne praw-

dopodobieństwa przedziałowe, w tym $P(E(t+1) > E_g)$, czyli – zgodnie z definicją – zagrożenie sejsmiczne.

B. Nie jest to definicja zagrożenia tąpnięciem (brak bowiem w literaturze ścisłej, ilościowej, umożliwiającej komputerową prognozę definicji tąpnięcia, które definiuje się zwykle „po skutkach”), lecz definicja zagrożenia sejsmicznego, które jest prawdopodobieństwem, że $E^c > E_g$, tzn. że energia całkowita wyemitowana w okresie ($t, t+\Delta t$) w obszarze S , przekroczy pewien próg, E_g . Chwilowo przyjmuje się, że S to obserwowana ściana, $\Delta t = 1$ godzina i że prognoza powtarzana będzie co Δt .

C. Prognoza zagrożenia sejsmicznego nie jest tożsama z prognozą „miejsca, czasu i energii”: miejsce jest z góry znane (obserwowana ściana S) i znany jest przedział czasu ($t, t+\Delta t$). Prognozowana jest tylko energia jako całkowita energia sejsmiczna E^c , zdefiniowana w postaci sumy

$$E^c[(t, t+\Delta t), S] = E^{AE}[(t, t+\Delta t), S] + E^w[(t, t+\Delta t), S] \quad (1)$$

gdzie: E^w to energia wstrząsów, E^{AE} to energia (w dżulach) AE. By sumowanie to było możliwe, energie muszą być addytywne i muszą pochodzić, obie, z $[(t, t+\Delta t), S]$.

D. Wartość E_g może być ustalana lokalnie, przez kopalnię. Konopko (1994) pisze jak określać E_g w różnych warunkach. Do prób przyjęto $E_g = 1 \cdot 10^5$ J.

E. Wprowadzenie „stanów zagrożenia” nawiązuje do istniejących metod (i ma ułatwić podejmowanie decyzji o profilaktyce, zależnie od „stanu”). Podział „przestrzeni zagrożeń” (czyli odcinka 0-1) na stany powinien być przedmiotem dyskusji specjalistów. Podana wyżej definicja zagrożenia nadaje po raz pierwszy, ścisły, fizyczny sens pojęciu „stan zagrożenia” (sejsmicznego).

F. Wiadome jest, że użytkownicy – w miejsce prognozy (stanu) zagrożenia sejsmicznego woleliby otrzymać prognozę (stanu) zagrożenia tąpnięciem lub prognozę „miejsca, czasu i energii” nadchodzącego silnego wstrząsu. Prognoza taka nie jest jednak dziś – zdaniem autorki – realna, nikomu się nie udało i świadomie z niej zrezygnowano, wierząc, że również zagrożenie sejsmiczne jest wielkością użyteczną.

G. Z matematycznego punktu widzenia, w definicji Z^s zażądać można przejścia do granicy ($\Delta t \rightarrow 0, s \rightarrow 0$) i stwierdzić, że zdefiniowano zagrożenie zdarzeniem punktowym w dziedzinie czasu i przestrzeni – czyli wstrząsem. Definicja utraciłaby jednak walor konstruktywności (definicja konstruktywna umożliwia obliczenie, definicja niekonstruktywna – nie) więc jej nie wprowadzono i nie zaleca się.

* Próg ten definiują, np. Konopko, 1994, Dubiński i Konopko 2000, Goszcz 2004 i inni

H. Co jednostkę Δt (np. co godzinę) estymowane, zgodnie z równaniem (1), wartości $E^c(t)$ archiwizować można sekwencyjnie, tworząc szeregi czasowe całkowitej energii sejsmicznej z obserwowanej ściany (S). Szeregi te mają istotną (choć zazwyczaj mniejszą niż szeregi energii samej tylko AE) autokorelację, mogą być więc (np. co Δt) w pewnym stopniu prognozowane (np.) metodami tak zwanej prognozy liniowej (np. Robinson 1967, Kornowski 2003, Kurzeja 2005, Kornowski i Kurzeja 2004, 2008). Jakość prognozy zależy od wartości autokorelacji szeregu czasowego $E^c(t)$.

I. Ponieważ badania wskazują, że energia emisji (AE) jest z zagrożeniem lepiej skorelowana niż aktywność, definicja zagrożenia sejsmicznego i nowa metoda prognozy tego zagrożenia całkowicie pomija aktywność (definiowaną jako liczba impulsów w jednostce czasu) i o zagrożeniu wnioskuje tylko na podstawie (całkowitej) energii emisji ($E^c(\Delta t) = E^W(\Delta t) + E^{AE}(\Delta t)$). Stosując energię AE (nie umowną) zapewniono jednoznaczność oceny i prognozy zagrożenia sejsmicznego niezależnie od liczby (z założenia nie mniejszej od dwóch) geofonów obserwujących ścianę.

3. OSZACOWANIE ENERGII AE, BEZ LOKALIZACJI

Przystępując do realizacji zadania uznano, że obecnie warunkiem realizmu, od którego zależy możliwość zastosowania metody, jest uniknięcie potrzeby lokalizowania źródeł AE i oparcie metody na tych danych, które i dziś normalnie napływają do stacji tapani w kopalni.

By obliczyć E^c zgodnie z (1) konieczne jest jednak, obliczenie fizycznej, wyrażonej w dżulach (J), energii AE. Zagadnienie to, obecnie uważane za podstawowy problem sejsmoakustyki górniczej, jest przedmiotem pracy (Kornowski, 2009) – którą potraktowano jako część drugą niniejszej publikacji – tu więc krótko tylko wzmiankowane są specyficzne cechy tego zagadnienia. Zauważmy, że gdy jedno źródło obserwowane jest za pomocą N geofonów, to otrzymuje się N różnych wartości energii umownej. Energia umowna jest więc zmodyfikowanym strumieniem (*) e^* energii fizycznej i ścisła estymacja energii E emitowanej ze źródła wymaga uprzedniej lokalizacji tego źródła – a więc rozwiązania problemu, którego

chcemy uniknąć (**). Jeżeli jednostka czasu (Δt) – określająca częstość prognozowania – jest wystarczająco długa, na przykład gdy Δt to godzina, lub, jeszcze lepiej, gdy Δt pokrywa się z okresem skrawu, to z czoła ściany emitowana jest wielka liczba impulsów AE, wielka na tyle, że możliwa jest – w danej jednostce czasu – aproksymacja przestrzennego rozkładu źródeł wzdłuż czoła ściany za pomocą zależności

$$e(x, y) \approx \bar{e} \cdot \xi_{xy}, \text{ gdzie } \log \xi_{xy} \sim N(0, \sigma^2) \quad (2)$$

gdzie ξ_{xy} jest zmienną losową nieujemną o wartości średniej 1 (zatem, np. o rozkładzie logarytmiczno-normalnym), natomiast \bar{e} to wartość średnia energii emisji z 1 m² ociosu w danej jednostce czasu. Uśredniając (2) i licząc dla całego ociosu (czoła ściany) o długości L i wysokości h , otrzymuje się wyemitowaną w Δt energię

$$\bar{E} = Lh\bar{e} \quad (3)$$

łatwo obliczalną, gdy znana jest średnia intensywność (\bar{e}) emisji energii (AE) z 1 m² ociosu. Po uwzględnieniu absorpcji energii falowej przez górotwór i po uwzględnieniu charakterystyki kierunkowej geofonów (Kornowski i Kurzeja 2008) zagadnienie to przedstawić można albo jako:

– problem nieliniowej, równoczesnej estymacji energii E oraz współczynnika γ absorpcji (energii w pokładzie), gdy dane są wartości EU , energii umownej z $N > 1$ geofonów obserwujących (ścianę) w danej jednostce czasu

$$(E, \gamma) = \min_{E, \gamma} \sum_{i=1}^N \{E[C_2 \cdot d(i) \cdot I(L, d(i), \gamma)(Lh)^{-1}] - EU(i)\}^2 \quad (4)$$

(gdzie „ i ” to numer geofonu, $d(i)$ to odległość geofonu od skrzyżowania chodnika przyścianowego z frontem ściany, L , h to długość i wysokość ściany, C_2 to wzmocnienie całego toru TSA, $I(L, d, \gamma)$ charakteryzuje górotwór; dokładniejszy opis podano w Kornowski 2009),

– w przybliżeniu zlinearyzowany problem równoczesnej estymacji (E, γ) na podstawie energii umownych (EU), który sprowadza się do rozwiązania układu (liniowych) równań

$$\ln E - Dd(i)\gamma = H(i) \quad i = 1, \dots, N \quad (5a)$$

* Strumieniem (e^*) energii falowej nazywamy energię przepływającą przez 1m² powierzchni prostopadłej do kierunku propagacji fali. Znając z pomiaru wartość e^* oraz, z lokalizacji, odległość (r) od źródła, można obliczyć energię E emitowaną ze źródła: $E = 4\pi r^2 e^*$ (bez absorpcji). Oszacowanie energii E bez lokalizacji źródeł, wymaga założenia rozkładu emisji z frontu ściany w okresie Δt .

** Trzeba tu dodać, że – wśród wielkości fizycznych związanych z energią emisji – tylko unormowana wartość strumienia e^* energii w otoczeniu czujnika (geofonu) może być przedmiotem bezpośredniego pomiaru. Interesująca geofizyków górniczych „energia źródłowa” (tzn. energia emitowana ze źródeł – np. zdarzeń AE – i wyrażona w dżulach, J) może być tylko estymowana (na podstawie e^*), gdy założony zostanie odpowiedni model źródeł (lub pola emisji) i górotworu. Jakość takiej estymacji zależy wprost od jakości założonych modeli.

gdzie: $H(i)=\ln(h \cdot A \cdot EU(i)) \cdot BL \cdot Cd(i)$ (5b)
oraz A, B, C, D to parametry linearyzujące funkcję $I(L, d, \gamma)$.

W przypadku (teoretycznym) dokładnych danych wejściowych, rozwiązanie problemu (4) daje dokładne wartości (E, γ) pod warunkiem akceptacji założonego modelu emisji (2). Rozwiązanie układu równań (5a), nawet dla dokładnych danych (i modelu (2)) daje tylko przybliżone wartości (E, γ) , lecz rozwiązanie to bardzo łatwo uzyskać.

Zauważyć należy, że metoda w obu wersjach nie wymaga lokalizacji ognisk (odpowiednią informację dostarcza model (2)) i korzysta wyłącznie z rutynowych obserwacji AE, na przykład odczytów z systemu ARES.

Równania (4) i/lub (5 a,b) umożliwiają więc – w każdej kolejnej jednostce czasu – estymację energii E emitowanej ze ściany, na podstawie zaobserwowanej (w tej jednostce czasu) energii umownej oraz wielkości (d_i, L, h) , które są znane i/lub stałe. Podstawowe znaczenie ma właściwa kalibracja toru AE, która musi być zawsze aktualna.

W ten sposób po raz pierwszy oferowana jest metoda estymująca energię i tłumienie ($\alpha=\gamma/2$) równocześnie i w sposób spójny.

Dotąd stosowane metody nieodmiennie zakładają/postulują wartość γ (zazwyczaj przyjmując $\gamma=0$) i na tej podstawie liczą energię, co prowadzi do ogromnych błędów.

4. SZEREGI CZASOWE ENERGII CAŁKOWITEJ I ICH PROGNOZA

Energia AE, obliczona za pomocą równania (4) lub (5) jest addytywna względem energii wstrząsów, oraz dotyczy tego samego obszaru i tej samej jednostki czasu – może więc być, zgodnie z (1), sumowana z energią wstrząsów, tworząc **szeregi czasowe (godzinowej, emitowanej z ustalonego obszaru S) zlogarytmowanej sejsmicznej energii całkowitej (E^c), które są, w mniejszym lub większym stopniu prognozowalne. Umożliwia to także sekwencyjną (tzn. z godziny na godzinę) prognozę Z^s , zagrożenia sejsmicznego oraz stanu (np. A, B, C, D) tego zagrożenia, bezpośrednio nawiązując do ocen klasyfikujących stosowanych przez obowiązujące dziś metody oceny stanu zagrożenia tąpnięciami.**

Wartości $r(\tau)$, autokorelacji tych szeregów czasowych obliczane są zgodnie ze standardowymi równaniami (np. Bielińska, 2002, s. 120, także Kurzeja 2005, s. 34). Następnie układane są i rozwiązywane tzw. równania Yule-Walkera (np. Bielińska, 2002, s. 127, także Kurzeja 2005, rozdz. 3.2.3), które umożliwiają

obliczenie parametrów a_i predyktora liniowego (Kornowski, Kurzeja 2004)

$$\bar{E}(t+1) = a_0 E^c(t) + a_1 E^c(t-1) + \dots + a_p E^c(t-p), \quad (6)$$

który, z końcem każdej kolejnej jednostki czasu o numerze t umożliwia prognozę energii $E^c(t+1)$, przy czym prognozowana jest zawsze (tzn. co godzinę) zarówno wartość średnia $\bar{E}(t+1)$ jak i jej wariancja.

Gdy przedmiotem prognozy jest (nie energia, $\bar{E}(t+1)$, lecz logarytm energii ($\log \bar{E}(t+1)$) to błąd prognozy ma rozkład zbliżony do normalnego. Zatem po obliczeniu wartości średniej i wariancji łatwo też obliczyć przedziały ufności i prawdopodobieństwo $P(E > E_g)$ przewyższenia progu E_g – czyli zagrożenie.

Rzecz jasna, wszystkie obliczenia wykonywane są przez odpowiedni program komputerowy, któremu – w chwili obecnej – obsługa dostarczyć musi (raz na godzinę) wartości energii wstrząsów i energii umownej AE w minionej godzinie i który – przed dodaniem tych energii – metodą opisaną w poprzednim rozdziale przekształca zbiór N wartości $EU(i)$ $i=1, \dots, N$ w jednoznacznie określoną (fizyczną, wyrażoną w dżulach, J) energię emisji.

Należy podkreślić, że wynik jest jednoznaczny, obejmuje zarówno metodę seismologii jak i metodę seismoakustyki (ani ich nie eliminując ani nie zaburzając ich działania) i w optymalny sposób prognozując zagrożenie i jego stan, zgodnie z definicją podaną w rozdz. 2.

Inżynierowie, odpowiedzialni za wynik prognozy (stanu) zagrożenia mogą (lecz nie muszą), zależnie od lokalnych warunków, ustalać progi (E_g) bezpieczeństwa (być może inne dla każdej ściany lub przodka chodnikowego) oraz wiązać stan (A, B, C, D) zagrożenia z prawdopodobieństwem przewyższenia progu bezpieczeństwa. Ich rola nie jest więc w żaden sposób ograniczana, a ich wiedza i doświadczenie są doceniane.

Przykładowe wartości progowe E_g , uzasadnione dotychczasową historią tępnięć i zależne od lokalnych warunków, podaje (np.) Konopko 1994 rozdz.7.2 nazywając tę wielkość „elementarną energią sejsmiczną tąpnięcia”, gdyż jest to minimalna energia, przy której – w danych warunkach – kiedykolwiek zanotowano tąpnięcie. Informacja o tej energii – w takim stopniu, w jakim jest ścisła – jest lub może być niezwykle ważna w zastosowaniach – gdyż potrafimy już (choć tylko w przybliżeniu) prognozować energię.

Zagadnienie określenia stanów (A, B, C, D) zagrożenia – ważne w zastosowaniach, gdyż ułatwia podejmowanie decyzji, umożliwiając powiązanie stanów z decyzjami o profilaktyce – jest o tyle kłopotliwe, że wymaga przypisania nazwy (np. A lub B...) i związanych z tym obowiązkowych działań profilaktycznych, pewnym przedziałom prawdopo-

dobieństwa (że wystąpi $E^c > E_g$), co nie musi być intuicyjnie oczywiste. Na pewno nie jest to zadanie dla geofizyka czy informatyka, lecz raczej dla właściciela przedsiębiorstwa lub dla organów nadzoru. Podkreślić trzeba, że takie podejście do zagadnienia, po raz pierwszy nadaje ścisły, ilościowy sens pojęciu „stanu (A, B, C, D) zagrożenia”, wiążąc nazwę stanu z prawdopodobieństwem, że $E^c > E_g$.

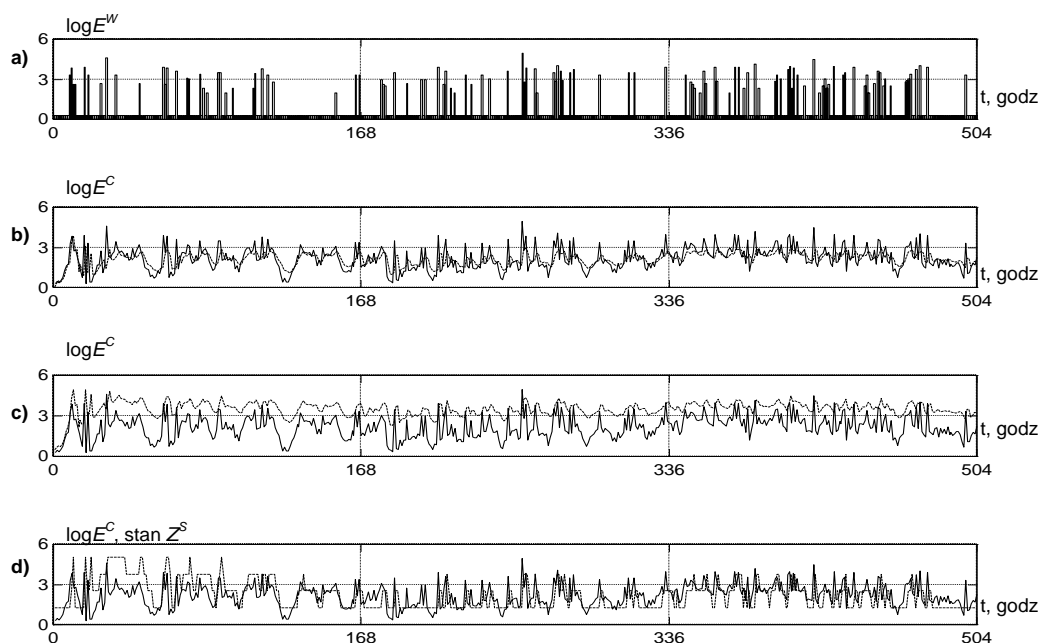
W definicji, podanej w rozdz. 2, jako przykład zaproponowano, by sytuację, gdy w danej ścianie i godzinie prawdopodobieństwo (P) (że energia całkowita emisji przewyższy lokalną wartość E_g) mieści się w przedziale $0 < P(E^c > E_g) \leq 10^{-5}$ nazwać stanem A, gdy $10^{-5} < P(E^c > E_g) \leq 10^{-4}$ – stanem B itd., lecz są to tylko wartości przykładowe.

Przykłady prognozy (rzeczywistych, długotrwałych obserwacji E^c) pokazano na rysunkach 2 i 3. Każdy z rysunków składa się z czterech wykresów. Na rys. 2 pokazano trzy tygodnie obserwacji i prognozy $\log E^c$ oraz zagrożenia (Z^s) i jego stanu (A, B, C, D) dla (silnie – to stwierdzenie nieformalne) zagrożonej ściany 37 z kopalni Wesola, natomiast na rys. 3 pokazano to samo, lecz dla słabo zagrożonej ściany 331 z kopalni Piekary. Rysunki te zbudowane są w sposób identyczny i poniższy opis odnosi się do obu tych rysunków. Na pierwszym od góry wykresie (rys. 2a i rys. 3a)

przedstawiono ciąg wstrząsów. Poniżej (b) pokazano dwie krzywe: krzywa ciągła to energie ($\log E^c(t)$) obserwowane, krzywa kropkowana to energie prognozowane. Jeszcze niżej, na trzecim wykresie (c), na tle energii obserwowanych pokazano prognozowaną wartość kwantyla $G_{0,95}$, czyli wartość ($\log E^c(t)$), która z prawdopodobieństwem 95% nie będzie przekroczona i jest to tak zwana prognoza bezpieczna. Na najniższym położonym wykresie (d) przedstawiono – znowu na tle energii obserwowanych – logarytm zagrożenia sejsmicznego ($\log Z^s$) zdefiniowanego w rozdz. 2. Wartości $\log Z^s$ – pokazane na rys. 2d – najczęściej pozostają na poziomie (-5) zatem prawdopodobieństwo przewyższenia progu $E^s = 1 \cdot 10^5$ J najczęściej jest rzędu 10^{-5} , **lecz zagrożenie to potrafi się szybko zmieniać: jest to zapewne najważniejsza różnica między sekwencyjnie (tzn. na bieżąco, z godziny na godzinę) licznym zagrożeniem sejsmicznym a zagrożeniem tąpnięciami licznym zgodnie z Instrukcją metody kompleksowej.**

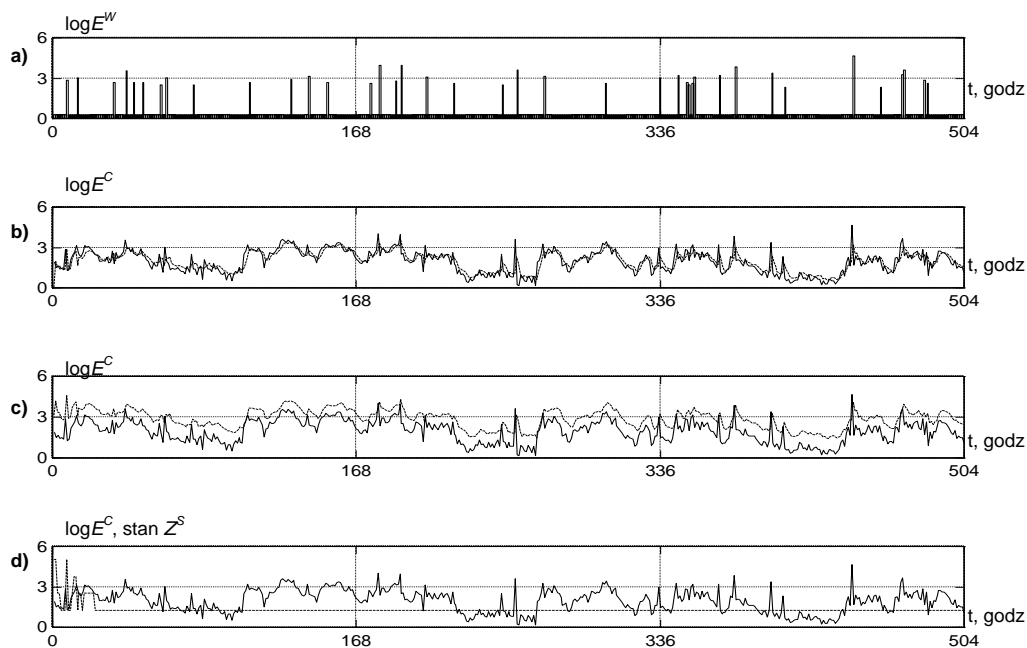
Na rys. 3d, dotyczącym słabo zagrożonej ściany 331 w kopalni Piekary zagrożenie cały czas (pomijając moment rozruchu metody) pozostaje stałe, na poziomie 10^{-5} .

Rysunki te pozwalają stwierdzić, że prognoza zagrożenia i jego stan, choć w przybliżeniu tylko, ale niezłe działa i projekt, w tym zakresie, dobrze rokuje.



Rys. 2. Przykładowe wyniki trzech tygodni obserwacji emisji sejsmicznej oraz prognozy stanu zagrożenia sejsmicznego w śc. 37 kopalni Wesola.

a) logarytm energii wstrząsów, b) prognozowana wartość $\log E^c$ (kropki) na tle obserwowanej wartości $\log E^c$ (linia ciągła), c) wartość G_{95} (kropki) na tle $\log E^c$, d) stan zagrożenia sejsmicznego (linia kropkowana, przyjmuje wartości: A=1,25, B=2,5, C=3,75, D=5) na tle $\log E^c$



Rys. 3. Przykładowe wyniki trzech tygodni obserwacji emisji sejsmicznej oraz prognozy stanu zagrożenia sejsmicznego w śc. 331 kopalni Piekary.

a) logarytm energii wstrząsów, b) prognozowana wartość $\log E^C$ (kropki) na tle obserwowanej wartości $\log E^C$ (linia ciągła), c) wartość G_{95} (kropki) na tle $\log E^C$, d) stan zagrożenia sejsmicznego (linia kropkowana, przyjmuje wartości: $A=1,25$, $B=2,5$, $C=3,75$, $D=5$) na tle $\log E^C$

5. WNIOSKI

Teoria metody nie jest zagadnieniem objętym tą pracą – tym niemniej jest ciekawa gdyż można, między innymi, wykazać optymalność zaproponowanej prognozy w określonych warunkach. Opis teorii i podstaw metody znajdzie się (m.in.) w książce (Kornowski i Kurzeja, 2008).

Przedmiotem zaproponowanej prognozy nie są zdarzenia sejsmiczne określone trzema parametrami, takimi jak: czas i miejsce wystąpienia oraz energia, lecz całkowita energia sejsmiczna $E_c[(t, t+\Delta t), S]$, w ustalonym, z góry znanym obszarze (S) i okresie czasu (Δt).

Jakość prognozy nigdy nie może być lepsza od jakości obserwacji, czyli od jakości lokalizacji i oceny energii zdarzeń minionych. Kiepskie obserwacje w sposób konieczny skutkują kiepskimi prognozami.

Prognoza dotyczy obszaru, z którego do czujników (AE) dociera – wystarczająco jakościowo i ilościowo – informacja o procesach niszczenia skały. Im mniej lub gorszej (zastumionej) informacji dociera do czujników z jakiegoś obszaru, tym słabiej prognozowane są zdarzenia, których źródła leżą w tym obszarze. Nie ma żadnej „granicy”, poza którą nie ma prognozy: ze wzrostem odległości od geofonów stopniowo pogarsza się jakość prognozy.

Prognozowanie energii wymaga uprzedniej obserwacji energii – oczywiście energii wyrażonej w dżulach.

Praca ta powstała w znacznym stopniu dzięki pomocy finansowej MNiSW udzielonej w formie grantu „Metoda oceny stanu zagrożenia tapaniami wyrobisk górniczych w zakładach wydobywających węgiel kamienny (R09030030).

Literatura

1. Bielińska E.: Metody prognozowania. Wyd. Śląsk, Katowice, 2002.
2. Dubiński J., Konopko W.: Tapania: ocena, prognoza, zwalczanie. Wyd. GIG, Katowice, 2000.
3. Goszcz A.: Wybrane problemy zagrożenia sejsmicznego i zagrożenia tapaniami w kopalniach podziemnych. Bibl. Szk. Ekspł. Podziemnej, Wyd. Nauka – Technika, Kraków, 2004.
4. Konopko W.: Doświadczalne podstawy kwalifikowania wyrobisk górniczych w kopalniach węgla kamiennego do stopni zagrożenia tapaniami. PN GIG, Nr 795, Katowice, 1994.
5. Kornowski J.: Linear prediction of aggregated seismic and seismoacoustic energy, emitted from a mining longwall. Acta Montana, Ser. A, No. 22(129), s. 5-14, 2003.
6. Kornowski J.: Energia umowna i energia emisji sejsmoakustycznej w przypadku obserwacji za pomocą aparatury ARES-5. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 2009, nr 5.
7. Kornowski J., Kurzeja J.: Liniowa prognoza całkowitej energii emisji sejsmicznej indukowanej eksploatacją górnictw. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 2004, nr 12.
8. Kornowski J., Kurzeja J.: Krótkookresowa prognoza zagrożenia sejsmicznego w górnictwie. Wyd. GIG, Katowice 2008.
9. Kurzeja J.: Sekwencyjna prognoza energii sejsmicznej generowanej eksploatacją pokładu węgla. PN GIG, No. 867, Katowice, 2005.
10. Lasocki S.: Predykcja silnych wstrząsów górniczych. ZN AGH, Seria: Geofizyka Stosowana, Z.7, Kraków, 1990.
11. Lasocki S.: Predykcja silnych wstrząsów górniczych – postscriptum. ZN AGH, Seria: Geofizyka Stosowana, Z.9, Kraków, 1992.
12. Robinson E.: Statistical communication and detection. Hafner Publ., New York, 1967.