

Przykład prognozy zagrożenia sejsmicznego z wykorzystaniem szacowanych zmian energii właściwej odkształcenia sprężystego

The example of seismic hazard prediction with the use of estimated changes of specific elastic strain energy



Dr hab. inż. Piotr Bańka, prof. Pol. Śl. *)



Mgr inż. Tomasz Cichy *)

Treść: W artykule przedstawiono wyniki badań nad możliwością wykorzystania obliczanych zmian energii właściwej odkształcenia sprężystego do opisu obserwowanego poziomu sejsmiczności indukowanej oraz w celu prognozowania jego wielkości na wybiegach projektowanych robót górniczych. Do szacowania zmian energetycznych wykorzystano rozwiązanie przemieszczeniowego zadania brzegowego przestrzennej teorii sprężystości podane przez H.Gila. Poziom sejsmiczności charakteryzowano wyznaczając gęstość energii wstrząsów. Ze względu na skomplikowany charakter badanych związków w prowadzonych badaniach zastosowano metodę analizy regresji. Obliczenia przeprowadzone dla wybranego, silnie zagrożonego sejsmicznie rejonu kopalni GZW pozwoliły stwierdzić istnienie zależności korelacyjnych pomiędzy parametrami charakteryzującymi przebieg procesów energetycznych zachodzących w warstwach skalnych a rejestrowanym poziomem sejsmiczności indukowanej (charakteryzowanym gęstością energii wstrząsów). Opracowany model regresji, po estymacji jego parametrów na podstawie sejsmiczności indukowanej w rozpatrywanym rejonie w trakcie prowadzenia dotychczasowych robót, może być wykorzystany do oceny poziomu sejsmiczności na wybiegach projektowanych robót w tym samym rejonie.

Abstract: This paper presents the results of studies on the possibility of using calculated specific elastic strain energy changes for the description of the observed level of induced seismicity and for the prediction of seismicity for planned mining works. Energy changes were calculated using the solution of spatial dislocation boundary condition of elastic strain theory given by H. Gil. Level of seismicity was characterized by determining the energy density of tremors. Due to a very complicated nature of the investigated relationship, the regression analysis method was applied in the studies. The calculations carried out for the selected area in Upper Silesian coal mine, subject to strong seismic hazards, demonstrated the presence of correlative dependences between the parameters characterizing the run of energy processes taking place in rock layers and the recorded level of induced seismicity (characterized by the energy density of tremors). The elaborated regression model, after the estimation of its parameters, basing on the induced seismicity in the investigated area during the current works, can be applied for the assessment of seismicity levels along the panel lengths of the planned works in the same area.

Słowa kluczowe:

sejsmiczność indukowana, energia odkształcenia sprężystego, prognoza sejsmiczności

Key words:

induced seismicity, elastic strain energy, seismicity prediction

1. Wprowadzenie

Zagrożenie sejsmiczne występuje w coraz większej liczbie rejonów prowadzonej eksploatacji węgla kamiennego. Pomimo malejącego wydobycia tego surowca, nie obserwuje

się proporcjonalnego zmniejszania liczby silnych wstrząsów i ich maksymalnych energii. Składa się na to wiele przyczyn, z których podstawowe znaczenie mają: wzrastająca głębokość eksploatacji, konieczność prowadzenia robót w resztkowych partiach złoża, w sąsiedztwie dyslokacji tektonicznych o dużych zrzutach, a także rosnąca koncentracja wydobycia wskutek ograniczania zakresu robót udostępniających, oraz

*) Politechnika Śląska w Gliwicach

dążenia do zwiększenia efektywności produkcji zakładów górniczych. Duży poziom zagrożenia sejsmicznego będzie najprawdopodobniej towarzyszył wykonywaniu wielu projektowanych aktualnie robót górniczych, stąd istotne jest doskonalenie metod prognozy tego zagrożenia.

W trakcie wieloletnich badań prowadzonych w Instytucie Eksploatacji Złóż Politechniki Śląskiej stwierdzono istnienie zależności korelacyjnych pomiędzy szacowanymi zmianami energetycznymi w górotworze a poziomem sejsmiczności indukowanej. Ilościowy opis zmian energetycznych dotyczy jedynie energii właściwej odkształcenia sprężystego, akumulowanej w górotworze w następstwie naruszenia go eksploatacją górnictwem, nie określa natomiast ilości energii wyzwolonej w procesie niszczenia określonej objętości skał. W procesie niszczenia ośrodka skalnego potencjalna energia sprężysta przechodzi w inne, praktycznie niewyznaczalne ilościowo rodzaje energii, w tym w energię kinetyczną fal sprężystych (energię sejsmiczną rejestrowanych wstrząsów) [9]. W ten sposób zmiany energii potencjalnej mają wpływ na obserwowaną sejsmiczność indukowaną. Nawet gdyby udało się znaleźć ściłą zależność funkcyjną wiążącą przebieg procesów energetycznych zachodzących w górotworze a zmianami poziomu sejsmiczności indukowanej, to najprawdopodobniej byłaby ona zbyt skomplikowana do praktycznego zastosowania. Z tego względu w prowadzonych badaniach stosowana jest metoda analizy regresji. Metoda ta pozwala przybliżyć poszukiwaną zależność funkcyjną inną, prostszą funkcją, która zawiera odpowiednie zmienne i przybliżyć poszukiwaną funkcję w pewnych ograniczonych przedziałach. Ponadto, nawet jeżeli nie istnieje zależność fizyczna pomiędzy analizowanymi wielkościami, dzięki metodzie regresji można dążyć do powiązania ich za pomocą równania regresji. Chociaż równanie to

może nie mieć znaczenia fizycznego, może ono być przydatne do przewidywania wartości zmiennej zależnej na podstawie znajomości zmiennych niezależnych [4].

W artykule przedstawiono przykład wykorzystania wyznaczonych zależności regresyjnych do opisu i prognozy zmian poziomu sejsmiczności indukowanej w wybranym, silnie zagrożonym wstrząsami rejonie kopalni węgla kamiennego w GZW.

2. Model regresji liniowej wiążący obliczane zmiany wartości energii właściwej z obserwowaną gęstością energii wstrząsów

Do szacowania zmian energetycznych zachodzących w wytrzymałych warstwach skalnych wykorzystywana jest metoda analityczna, opierająca się na rozwiązaniu przemieszczeniowego zadania brzegowego liniowej teorii sprężystości podanym przez H. Gila [6], określającym rozkład naprężeń i odkształceń w półprzestrzeni wokół pustki o kształcie prostokąta.

Zgodnie z tym rozwiązaniem, stan naprężenia i odkształcenia wywołany w górotworze elementarnym wybraniem w kształcie prostokąta o bokach $2d_1$ i $2d_2$ przy przyjętych następujących warunkach brzegowych:

$$\begin{aligned} \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \text{ dla całej płaszczyzny } z = 0, \\ w(x,y,0) = \begin{cases} -w_0 \text{ dla } |x| \leq d_1 \text{ i } |y| \leq d_2 \\ 0 \text{ dla } |x| > d_1 \text{ i } |y| > d_2 \end{cases}, \end{aligned} \quad (1)$$

dla $z \rightarrow \infty$ wszystkie składowe naprężeń maleją do 0, określają zależności:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{G}{(1-\nu)} \left[2\nu \frac{\partial f_3}{\partial z} + 2(1-\nu) \frac{\partial f_1}{\partial x} - z \frac{\partial^2 f_3}{\partial x^2} \right], \quad \varepsilon_x = \frac{\partial f_1}{\partial x} - \frac{z}{2(1-\nu)} \frac{\partial^2 f_3}{\partial x^2}, \\ \sigma_y &= \frac{G}{(1-\nu)} \left[2 \frac{\partial f_3}{\partial z} + 2(1-\nu) \frac{\partial f_2}{\partial y} - z \frac{\partial^2 f_3}{\partial y^2} \right], \quad \varepsilon_y = \frac{\partial f_2}{\partial y} - \frac{z}{2(1-\nu)} \frac{\partial^2 f_3}{\partial y^2}, \\ \sigma_z &= \frac{G}{(1-\nu)} \left[\frac{\partial f_3}{\partial z} - z \frac{\partial^2 f_3}{\partial x \partial z} \right], \quad \varepsilon_z = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \frac{\partial f_3}{\partial z} - \frac{z}{2(1-\nu)} \frac{\partial^2 f_3}{\partial z^2}, \\ \tau_{xy} &= \frac{G}{(1-\nu)} \left[(1-\nu) \left(\frac{\partial f_1}{\partial y} + \frac{\partial f_2}{\partial x} \right) - z \frac{\partial^2 f_3}{\partial x \partial y} \right], \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial f_1}{\partial y} + \frac{\partial f_2}{\partial x} - \frac{z}{1-\nu} \frac{\partial^2 f_3}{\partial x \partial y}, \\ \tau_{zx} &= \frac{G}{(1-\nu)} z \frac{\partial^2 f_3}{\partial x \partial z}, \quad \gamma_{yz} = \frac{z}{1-\nu} \frac{\partial^2 f_3}{\partial y \partial z}, \\ \tau_{zy} &= \frac{-G}{(1-\nu)} z \frac{\partial^2 f_3}{\partial y \partial z}, \quad \gamma_{xz} = \frac{z}{1-\nu} \frac{\partial^2 f_3}{\partial x \partial z}, \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:

- $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ – składowe tensora naprężenia, MPa
- $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ – składowe tensora odkształcenia,
- w_0 – przemieszczenie stropu wywołane elementarnym wybraniem, m
- f_1, f_2, f_3 – funkcje zależne od wartości w_0, d_1, d_2, d_3 i d_4, x, y, z, G i ν ,
- x, y, z – współrzędne punktu obliczeniowego, m
- G – moduł sprężystości postaciowej, MPa
- ν – współczynnik Poissona.

W przypadkach stosowania przedstawionego rozwiązania do wykonywania obliczeń dotyczących rzeczywistych sytuacji górniczych, konieczne jest wykorzystywanie zasady superpozycji. Może to powodować powstawanie dużych błędów oszacowań składowych tensorów naprężenia i odkształcenia z uwagi na fakt, że zasada ta nie obowiązuje w odniesieniu do sumowania naprężeń. Ponadto, przyjęty model górotworu (ośrodek ciągły, jednorodny, izotropowy oraz liniowo-sprężysty) stanowi bardzo duże uproszczenie górotworu rzeczywistego; brak również dokładnej informacji o budowie górotworu i właściwościach skał zalegających w naruszanej bieżącej eksploatacją górniczą jego części. Z tego względu niezbędne jest wykonywanie prognoz rozkładów naprężeń i odkształceń metodą porównawczą. Oznacza to, że przed przystąpieniem do właściwych obliczeń prognostycznych przeprowadza się obliczenia porównawcze dla zrealizowanych już robót górniczych. W trakcie tych testów tak dobiera się wartości parametrów charakteryzujących geometrię eksploatacji oraz właściwości mechaniczne górotworu, by uzyskane rezultaty były zgodne z wynikami obserwacji dołowych [2]. Jeśli przykładowo średnia wartość modułu sprężystości postaciowej skał stropowych G przekracza 10 GPa, to wartość zastępcza przyjmowana w obliczeniach często jest nawet kilkunastokrotnie mniejsza (w obliczeniach prezentowanych w dalszej części artykułu przyjmowano, że $G = 1$ GPa).

Energję właściwą odkształcenia sprężystego określa wzór:

$$\Phi = 0,5T_{\sigma}T_{\epsilon}, \tag{3}$$

gdzie:

- Φ – energia właściwa odkształcenia sprężystego, J/m³
- T_{σ} – tensor stanu naprężenia, MPa
- T_{ϵ} – tensor stanu odkształcenia.

Po rozpisaniu

$$\Phi = \frac{1}{2}(\sigma_x \epsilon_x + \sigma_y \epsilon_y + \sigma_z \epsilon_z + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{yz} \gamma_{yz} + \tau_{zx} \gamma_{zx}) \tag{4}$$

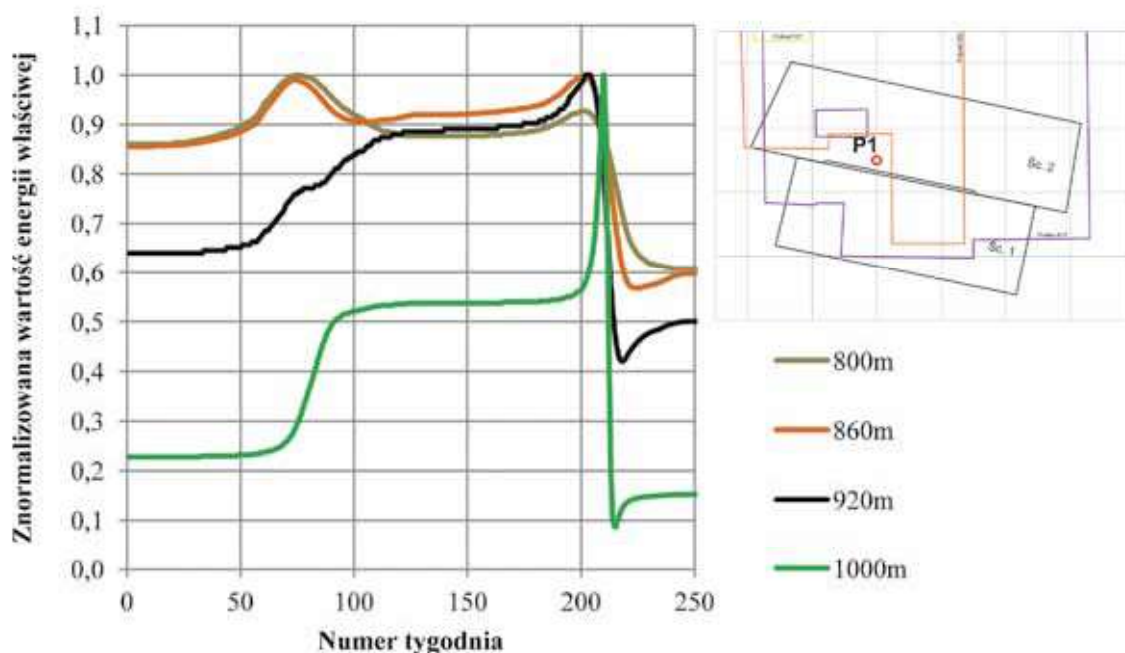
Wartości energii właściwej ulegają silnym zmianom w okresie, gdy górotwór jest obejmowany wpływami postępującego frontu eksploatacyjnego. Przykładowo, na rys. 1 przedstawiono zmiany energetyczne zachodzące w wybranym punkcie P1, położonym w rejonie rozpatrywanej w artykule eksploatacji górniczej, na głębokościach zalegania wstrząsogennych warstw skalnych.

Wstrząsy indukowane eksploatacją górniczą występują zarówno na wybiegach, jak i w zrobach prowadzonych ścian (w trakcie obciążania, jak i odciążania deformowanej warstwy skalnej). Oba procesy zachodzą z różną intensywnością, zależną m.in. od chwilowego położenia rozpatrywanego punktu w stosunku do frontu ścianowego, od parametrów tej bieżącej eksploatacji i od sposobu ukształtowania zaszłości eksploatacyjnych. Dlatego uzasadnione jest porównywanie wielkości sejsmiczności indukowanej zarówno z obliczonymi przyrostami, jak i spadkami energii właściwej. Dyssypacja zakumulowanej energii przebiega inaczej w sytuacji, gdy skały nie są zniszczone, a inaczej, gdy skały uległy już zniszczeniu (wskutek oddziaływania wcześniej prowadzonych robót górniczych). Do określania, czy skały uległy zniszczeniu, wykorzystywany jest uogólniony warunek Hoeka-Browna [7]

$$\sigma_1' = \sigma_3' + R_c \left(m_b \frac{\sigma_3'}{R_c} + s \right)^n, \tag{5}$$

gdzie:

- σ_1', σ_3' – największe i najmniejsze efektywne naprężenie główne, MPa
- R_c – doraźna wytrzymałość na ściskanie próbki nienaruszonej skały, MPa
- $m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$,
- $s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$,



Rys. 1. Zmiany znormalizowanej wartości energii właściwej w punkcie P1 obejmowanym wpływami eksploatacji pokładu 506 prowadzonej w polach ścian 1 i 2

Fig. 1. Changes of normalized values of specific energy at point P1 subject to the influence of mining conducted in the seam no. 506 in the area of longwalls 1 and 2

$$n = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(\exp\left(\frac{-GSI}{15}\right) - \exp\left(\frac{-20}{3}\right) \right),$$

m_i – wartość stałej m dla skały nienaruszonej,
 GSI – Geological Strength Index, którego wartość odczytywana jest z nomogramu [7],

D – współczynnik zależny od stopnia naruszenia górotworu, zmieniający się od 0 dla górotworu nienaruszonego do 1 dla górotworu silnie naruszonego.

Korzystając z warunku Hoeka-Browna obliczany jest wskaźnik wyężenia W

$$\text{– dla } \sigma_3 \geq -R_r: \quad W = \frac{\sigma_1}{\sigma_1}, \quad (6)$$

gdzie:

R_r – wytrzymałość skały na rozciąganie,
 σ_1, σ_3 – odpowiednio: największa i najmniejsza składowa naprężeń głównych,
 – dla $\sigma_3 < -R_r$:

$$W = \frac{|\sigma_3|}{R_r}. \quad (7)$$

W przyjętym modelu regresji uwzględniane są obliczane przyrosty (spadki) energii właściwej z rozdzieleniem na zachodzące przed hipotetycznym zniszczeniem skały (wskaźnik wyężenia $W < 1$) oraz po nim (wskaźnik wyężenia $W \geq 1$). Brane pod uwagę są zmiany energetyczne zachodzące w jednej bądź kilku warstwach wstrząsogennych. Omawiany model był w różnym zakresie wykorzystywany we wcześniejszych pracach mających na celu poszukiwanie związków sejsmiczności indukowanej z obliczanymi wskaźnikami charakteryzującymi przebieg procesów deformacyjnych (np. 3, 5) i energetycznych [np. 1, 8] w górotworze.

Wydatek energetyczny wstrząsów [J/m^3] w danym punkcie obliczeniowym w okresie prowadzenia robót T ($T = I_{dt} \Delta t$, gdzie Δt – jednostkowy przedział czasu) określa wyrażenie:

$$E_{obl l} = \sum_{k=1}^{l_w} \left(\sum_{j=1}^4 a_{kj} f_{jkl} + a_{k0} \right) + \delta_l \quad \text{dla } l = 1 \dots l_{pkt}, \quad (8)$$

gdzie:

$E_{obl l}$ – wydatek energetyczny wstrząsów obliczony w punkcie l , J/m^3

l_w – liczba wstrząsogennych warstw skalnych,

l_{pkt} – liczba punktów obliczeniowych,

a_{kj} – parametry modelu regresji,

l_{dt} – liczba jednostkowych przedziałów czasu,

δ_l – składnik losowy,

$f_{2kl} = \sum_{i=1}^{l_{dt}} \Delta \Phi_{i obl (W < 1)}^-$ – obliczone w punkcie l dla k -tej warstwy skalnej sumy chwilowych przyrostów energii właściwej, w sytuacji gdy wskaźnik wyężenia $W < 1$,

$f_{2kl} = \sum_{i=1}^{l_{dt}} \Delta \Phi_{i obl (W < 1)}^-$ – obliczone w punkcie l dla k -tej warstwy skalnej sumy chwilowych spadków energii właściwej, w sytuacji gdy wskaźnik wyężenia $W < 1$,

$f_{4kl} = \sum_{i=1}^{l_{dt}} \Delta \Phi_{i obl (W \geq 1)}^-$ – obliczone w punkcie l dla k -tej warstwy skalnej sumy chwilowych przyrostów energii właściwej, w sytuacji gdy wskaźnik wyężenia $W \geq 1$,

$f_{4kl} = \sum_{i=1}^{l_{dt}} \Delta \Phi_{i obl (W \geq 1)}^-$ – obliczone w punkcie l dla k -tej warstwy skalnej sumy chwilowych spadków energii właściwej, w sytuacji gdy wskaźnik wyężenia $W \geq 1$.

Dodatkowo przyjęto ograniczenia postaci:

$$0 \leq a_{kj} \leq 1000 \quad \text{dla } k = 1 \dots l_w, j = 1 \dots 4, \quad (9)$$

$$-1000 \leq a_{k0} \leq 1000 \quad \text{dla } k = 1 \dots l_w.$$

Przedstawiony model cechuje stosunkowo duża liczba parametrów ($5 \times l_w$), co może uniemożliwić jego wykorzystanie w przypadku większej liczby warstw wstrząsogennych. Z uwagi na tą wadę modelu liniowego dla dużej liczby wstrząsogennych warstw skalnych można wykorzystywać model nieliniowy. W modelu tym przyjmuje się, że parametry równania regresji są stałe dla poszczególnych warstw, przy czym każda z warstw ma przyporządkowany do siebie parametr wyrażający jej udział w całej zarejestrowanej sejsmiczności.

Poziom sejsmiczności indukowanej charakteryzowany był poprzez obliczanie wydatku energetycznego wstrząsów na jednostkę objętości górotworu E_{ge} , J/m^3 zgodnie z zależnością

$$E_{ge} = \sum_{i=1}^{n_w} \frac{E_i^{0.66}}{0.36 R_w^3} \exp\left\{-\pi \left[\frac{(x - x_{wi})^2}{R_w^2} + (y - y_{wi})^2 \right] \right\} \quad (10)$$

gdzie:

E_i – energia sejsmiczna i -tego wstrząsu, J

x_{wi}, y_{wi} – współrzędne ogniska i -tego wstrząsu, m

x, y – współrzędne punktu obliczeniowego, m

n_w – liczba wstrząsów zarejestrowanych w rozpatrywanym okresie,

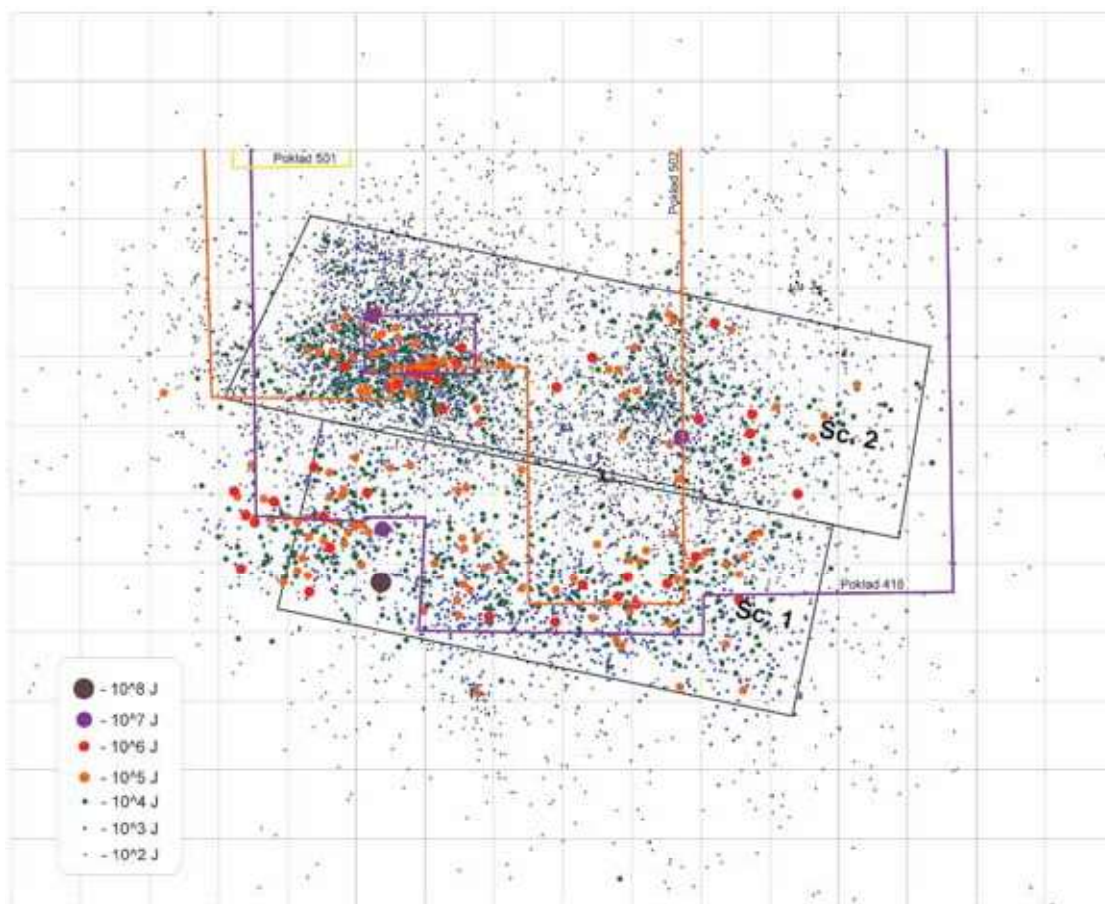
R_w – promień rozproszenia energii wstrząsu; przyjmowano wartość $R_w = 100 \text{ m}$.

Do wyznaczenia parametrów modelu (minimalizacji funkcji celu - normy $L1$ bądź $L2$ wektora różnic obliczonych i zaobserwowanych wartości wydatku energetycznego wstrząsów) został wykorzystany algorytm ewolucyjny różnicowy [9]. Jest to algorytm stochastyczny, wykorzystujący w procesie optymalizacji przekształcaną populację wektorów bazowych. Podstawową ideą, która znalazła swoje odzwierciedlenie w nazwie algorytmu, jest wykorzystywanie do przekształcania populacji wektorów różnic pomiędzy losowo wybranymi z tej populacji wektorami.

3. Ogólna charakterystyka rejonu badań

Analizę związków sejsmiczności indukowanej ze zmianami energetycznymi zachodzącymi we wstrząsogennych warstwach skalnych przeprowadzono dla rejonu robót prowadzonych w warunkach dużego zagrożenia wstrząsami i tąpnięciami w jednej z kopalni GZW. Eksploatacja prowadzona była w polach dwóch ścian 1 i 2 w pokładzie 506 (rys. 2), którego miąższość zmienia się od 2 do 3 m. Głębokość zalegania wynosi około 1030 m, upad warstw: $3^\circ \div 14^\circ$ w kierunku południowym. W rejonie prowadzonych w latach 2010÷2014 ścian 1 i 2 wyeksploatowano wyżej zalegające pokłady, m.in.: 418 w odległości około 140 m, 501 w odległości około 100 m i 502 w odległości około 80 m. W profilu geologicznym występuje kilka potencjalnie wstrząsogennych warstw piaskowca, na których poziomach obliczono wartości energii właściwej. Są to warstwy o miąższościach około: 20 m, 24 m, 27 m i 21 m, zalegające w odległościach odpowiednio: 230 m, 170 m, 110 m i 30 m nad pokładem 506.

Rozpatrywanej eksploatacji pokładu 506 towarzyszył wysoki poziom sejsmiczności. Ogółem zarejestrowano ponad 8000 wstrząsów o sumarycznej energii blisko $5 \times 10^8 \text{ J}$. Najsilniejszy wstrząs, który wystąpił w trakcie prowadzenia ściany 1 osiągnął energię $2 \times 10^8 \text{ J}$. Zestawienie sejsmiczności indukowanej podano w tabl. 1 oraz w postaci histogramu energii zarejestrowanych wstrząsów na rys. 3.



Rys. 2. Kontury rozpatrywanej eksploatacji pokładu 506 z naniesionymi ogniskami wstrząsów
 Fig. 2. Contours of the investigated exploitation of seam no. 506 with marked tremor foci

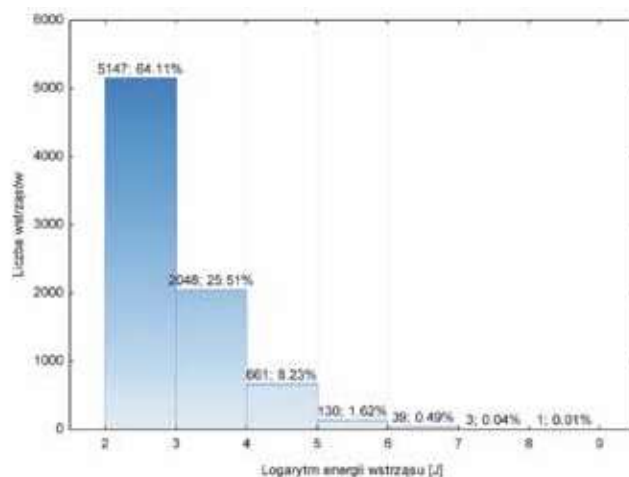
Tablica 1. Liczba i sumaryczna energia sejsmiczna zarejestrowanych wstrząsów

Table 1. Number and summary seismic energy of recorded tremors

Rząd energii, J	Liczba wstrząsów	Suma energii, J
102	5144	3,49x10 ⁶
103	2048	1,01x10 ⁷
104	661	3,13x10 ⁷
105	130	7,07x10 ⁷
106	39	1,23x10 ⁸
107	3	6x10 ⁷
108	1	2x10 ⁸
Razem	8029	4,99x10 ⁸

Jak wynika z powyższych danych, ponad 60% zarejestrowanych wstrząsów charakteryzowało się bardzo małą energią, rzędu 102 J. Prawie 90% zjawisk nie przekroczyło energii 104 J. Zwraca uwagę również to, że jeden, najsilniejszy, wstrząs stanowi około 40% całego wydatku energetycznego, jaki zarejestrowano w trakcie robót w polach ścian 1 i 2.

Wstrząsy, które wystąpiły w rejonie ścian 1 i 2 nie spowodowały negatywnych skutków zarówno w samej ścianie, jak i wyrobiskach przyścianowych. Ich wystąpienie kopalnia wiąże w przeważającej większości z pękaniem mocnych skał zalegających nad pokładem 506 (w tym piaskowców nad pokładem 504) w warunkach występowania zaszczości eksploatacyjnych. W trakcie biegu przedmiotowych ścian prowadzono profilaktykę aktywną w postaci strzelań torpedujących w skałach stropowych.



Rys. 3. Histogram energii zarejestrowanych wstrząsów
 Fig. 3. Histogram of seismic energy of recorded tremors

4. Zależności korelacyjne pomiędzy wydatkiem energetycznym wstrząsów i zmianami energetycznymi

Korzystając z danych o czasoprzestrzennym przebiegu eksploatacji górniczej w rozpatrywanej partii złoża, wykonano obliczenia zmian energii właściwej odkształcenia sprężystego w czterech potencjalnie wstrząsogennych warstwach skalnych w siatce regularnie rozmieszczonych (co 25 m) 3445 punktów obliczeniowych. Uwzględniono okres prowadzenia obu rozpatrywanych ścian, przyjmując 7-dniowe jednostkowe

przedziały czasu – kroki postępu frontów eksploatacyjnych. Przebieg obliczonych zmian energetycznych dla wybranego punktu przedstawiono na rys. 1. Szacowane w całym okresie prowadzenia robót wybierkowych w polach ścian 1 i 2 zmiany przyrostów i spadków energii właściwej, z uwzględnieniem wartości wskaźnika wyężenia (rys. 4b), skorelowano z zaobserwowanym rozkładem wydatku energetycznego wstrząsów pokazanym na rys. 4a.

Wyniki obliczeń parametrów modelu regresji podano w tabl. 2.

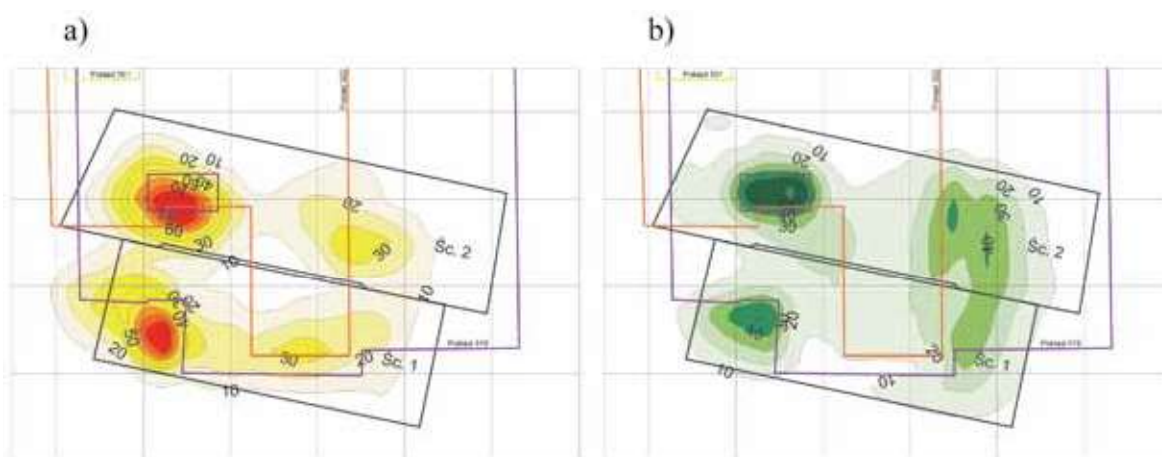
Wyznaczona wartość współczynnika korelacji liniowej pomiędzy wartościami obserwowanymi a obliczonymi z wyznaczonego równania regresji wynosi 0,81. Oznacza to, że równanie to może wyjaśnić około 65% obserwowanej zmienności wydatku energetycznego wstrząsów. Wartość błędu średniokwadratowego regresji wynosi 7,3 J/m³. Porównując rozkład obliczonej z rozkładem zaobserwowanej gęstości energii wstrząsów, można stwierdzić ich stosunkowo

dużą zgodność, szczególnie w odniesieniu do lokalizacji stref wzmoczonego wydatku energetycznego wstrząsów.

Kolejny etap badań miał na celu sprawdzenie zdolności predykcyjnych opracowanego modelu. W związku z tym okres prowadzenia robót podzielono na dwa podokresy:

- 1.01.2010 ÷ 1.07.2012 – wykorzystując dane o zarejestrowanej sejsmiczności w tym okresie i obliczone wartości wskaźników charakteryzujących zmiany energetyczne, przeprowadzono estymację parametrów modelu regresji,
- 1.07.2012 ÷ 1.12.2014 – dla którego, wykorzystując wyznaczone równanie regresji przeprowadzono obliczenia zmian gęstości energii wstrząsów. Prognozowane zmiany sejsmiczności porównano z zaobserwowanymi w trakcie prowadzenia robót w polu ściany 2.

Wyniki obliczeń parametrów modelu regresji w oparciu o dane zaobserwowane w trakcie prowadzenia ściany 1 podano w tabl. 3.



Rys. 4. Rozkład zaobserwowanej (a) i obliczonej z wyznaczonego równania regresji (b) gęstości energii wstrząsów [J/m³] w okresie prowadzenia ścian 1 i 2

Fig. 4. Distribution of the tremors energy densities [J/m³] observed (a) and calculated with the determined regression equation (b), during the mining period of longwalls 1 and 2

Tablica 2. Wyniki obliczeń parametrów modelu regresji – uwzględnione wstrząsy zarejestrowane w trakcie biegu ścian 1 i 2

Table 2. Calculation results of regression model parameters – tremors recorded during the mining period of longwalls 1 and 2 were taken into account

Nr warstwy „j”	Głębokość, m	Wartości parametrów modelu regresji			
		a_{1j}	a_{2j}	a_{3j}	a_{4j}
1	800	0,0	302,3376	0,0	0,0
2	860	32,6757	0,0	17,7556	37,9634
3	920	0,0	12,5523	17,9938	61,9366
4	1000	6,2334	6,3908	0,0	0,8294
Wyraz wolny a_0		-0,5796	Wartość błędu średniokwadratowego J/m ³		7,3

Tablica 3. Wyniki obliczeń parametrów modelu regresji – uwzględnione wstrząsy zarejestrowane w trakcie biegu ściany 1

Table 3. Calculation results of regression model parameters – tremors recorded during the mining period of longwall 1 were taken into account

Nr warstwy „j”	Głębokość, m	Wartości parametrów modelu regresji			
		a_{1j}	a_{2j}	a_{3j}	a_{4j}
1	800	0,0	320,99	0,0	0,0
2	860	21,2382	0,0	56,3128	5,5156
3	920	0,0	46,6625	14,7486	9,6746
4	1000	14,3629	8,5955	0,0	0,0
Wyraz wolny a_0		-0,3621	Wartość błędu średniokwadratowego J/m ³		4,8

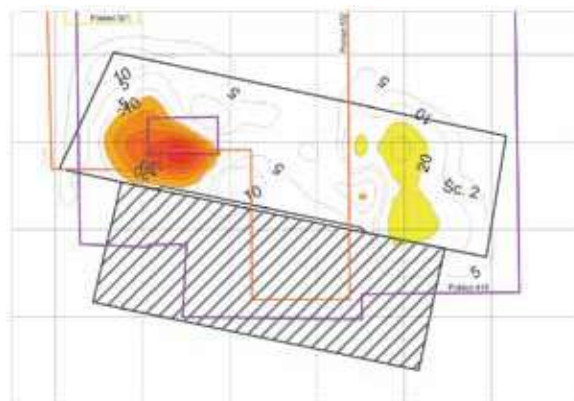
W tym przypadku wyznaczona wartość współczynnika korelacji liniowej wynosi 0,83, natomiast wartość współczynnika determinacji wynosi 0,71, czyli 71% obserwowanej zmienności gęstości energii wstrząsów jest wyjaśniana równaniem regresji. Wartość błędu średniokwadratowego regresji wynosi 4,8 J/m³.

Na rys. 5 zaprezentowano zaobserwowane i obliczone z wyznaczonego równania rozkłady gęstości energii wstrząsów sporządzone dla okresu prowadzenia ściany 1.

Wyznaczone w powyższy sposób równanie regresji zostało zastosowane do sporządzenia prognozy zmian gęstości energii wstrząsów na wybiegu ściany 2. Wyniki tak zrealizowanej „prawdziwej” prognozy wydatku energetycznego wstrząsów (rys. 6b) porównano z sejsmicznością zarejestrowaną (rys. 6a).

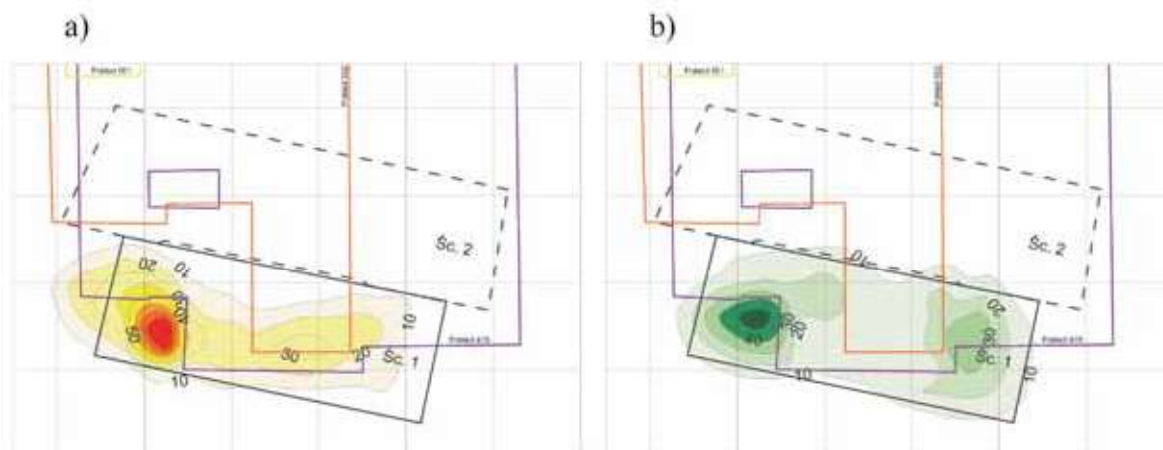
Wyznaczone równanie regresji umożliwiło stosunkowo dokładną prognozę sejsmiczności indukowanej na wybiegu ściany 2. W szczególności, trafnie udało się wskazać rejon podwyższonej sejsmiczności. Nie udało się natomiast zaprognozować dużej wartości gęstości energii wstrząsów, którą zaobserwowano w trakcie prowadzenia ściany 2 w zasięgu oddziaływania resztki pozostawionej w pokładzie 418; maksymalne niedoszacowanie prognozowanej wartości gęstości energii wstrząsów wynosi 59,5 J/m³, podczas gdy przeszacowanie (na początkowym odcinku biegu ściany)

osiąga mniejszą wartość, wynoszącą 39,0 J/m³. Wartość błędu średniokwadratowego regresji wynosi 6,0 J/m³, wartość współczynnika korelacji liniowej pomiędzy wartościami obserwowanymi i prognozowanymi wynosi 0,78 (wartość współczynnika determinacji: 0,61). Na rys. 7 pokazano roz-



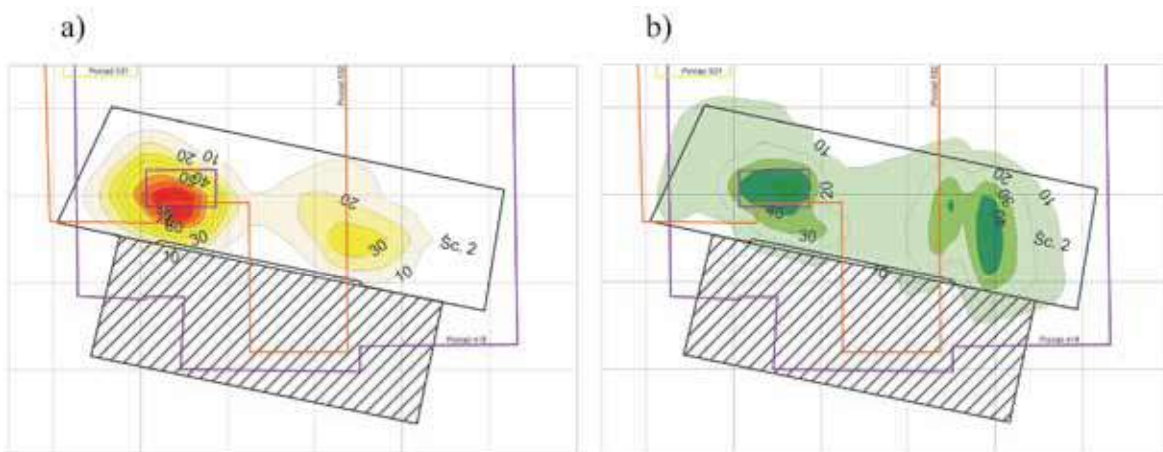
Rys. 7. Rozkład wartości błędu bezwzględnej prognozy gęstości energii wstrząsów [J/m³]

Fig. 7. Distribution of the absolute error value of prediction of the energy density of tremors [J/m³]



Rys. 5. Rozkład zaobserwowanej (a) i obliczonej z wyznaczonego równania regresji (b) gęstości energii wstrząsów [J/m³] w okresie prowadzenia ściany 1

Fig. 5. Distribution of the tremors energy densities [J/m³] observed (a) and calculated with the determined regression equation (b), during the mining period of the longwall 1



Rys. 6. Rozkład zaobserwowanej (a) i prognozowanej wyznaczonym równaniem regresji (b) gęstości energii wstrząsów [J/m³] w okresie prowadzenia ściany 2

Fig. 6. Distribution of the tremors energy densities [J/m³] observed (a) and predicted with the determined regression equation (b), during the mining period of the longwall 2

kład wartości błędu bezwzględnego prognozy. Na przeważającej części pola ściany wartość błędu nie przekracza 10 J/m^3 .

5. Podsumowanie

Obliczenia przeprowadzone dla wybranego rejonu pozwoliły stwierdzić istnienie zależności korelacyjnych pomiędzy parametrami charakteryzującymi przebieg procesów energetycznych zachodzących w warstwach skalnych a rejestrowanym poziomem sejsmiczności indukowanej (charakteryzowanym wydatkiem energetycznym wstrząsów). Zależności te mogą być wykorzystane do oceny poziomu sejsmiczności na wybiegach projektowanych robót w tym samym rejonie, jak pokazały wyniki prezentowanych obliczeń, z wystarczającą dla praktyki górniczej dokładnością.

Prezentowana metoda może stanowić uzupełnienie dotychczas stosowanych metod oceny stanu zagrożenia sejsmicznego. Sposób ten może być stosowany przede wszystkim w tych rejonach, w których o poziomie sejsmiczności decyduje konfiguracja krawędzi i resztek w eksploatowanym pokładzie, a także w pokładach sąsiednich, w mniejszym zaś stopniu zmienna budowa geologiczna górotworu. Ze względu na zastosowanie analizy regresji, opracowana metoda ma charakter lokalny. Oznacza to, że predykcję z wykorzystaniem wyznaczonego równania regresji powinno się wykonywać tylko dla tego rejonu, z którego pochodziły dane użyte do estymacji parametrów modelu. Opracowany sposób nie może być stosowany w rejonach, w których dopiero rozpoczyna się eksploatację górnictwem oraz nie można za jego pomocą przewidywać poziomu sejsmiczności indukowanej w rejonach, gdzie dotychczas nie rejestrowano wstrząsów górniczych.

Literatura

1. *Bańka P.*: Modelowanie zmian sejsmiczności indukowanej na podstawie szacowanych stanów energetycznych górotworu. Wyd. Pol. Śl., Gliwice 2013.
2. *Bańka P., Jaworski A., Plewa F.*: Ocena zagrożenia wstrząsami i tapaniami wyrobisk podziemnych metodami analitycznymi. „Przeгляд Górnicy” 2012, nr 1, s. 13-19.
3. *Bańka P.*: Dependence of Induced Seismicity on the changes of Rock Deformation State Defined in the Function of Time. Acta Montana IRSM AS CR Series A, No. 16(118), 2000, pp. 7-16.
4. *Draper N.R., Smith H.*: Analiza regresji stosowana. PWN, Warszawa 1973.
5. *Drzeźła B., Białek J., Jaworski A.*: Prognozowanie metodą analityczną sejsmiczności indukowanej wielopokładową eksploatacją. Mat. Konf. nt. Tematyka bezpieczeństwa pracy w górnictwie w Grantach KBN, GIG, Rudy Raciborskie 1993, s. 169-184.
6. *Gil H.*: The Theory of Strata Mechanics. PWN, Warszawa 1991.
7. *Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B.*: Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 edition. Proc. NARMS-TAC Conference, Toronto, 2002, pp. 267-273.
8. *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), 2004, pp. 7-17.
9. *Salamon M.D.G.*: Energy Considerations in Rock Mechanics: Fundamental Results. IS.Afr.Inst.Min.Metal., Vol. 84, No. 8, 1984, pp. 951-1099.
10. *Storn R., Price K.*: Differential Evolution – A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. Journal of Global Optimization, No. 11, 1997, pp. 341-359.

Zwiększajmy prenumeratę najstarszego – czołowego miesięcznika Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Górnictwa!

Liczba zamawianych egzemplarzy określa zaangażowanie jednostki gospodarczej w procesie podnoszenia kwalifikacji swoich kadr!