

**Henryk KLETA****Stanisław DUŻY**

Instytut Geomechaniki, Budownictwa Podziemnego

i Ochrony Powierzchni

Politechniki Śląskiej, Gliwice

## **MODELOWANIE WSPOMAGANE KOMPUTEROWO STANÓW ENERGETYCZNYCH W DUŻYCH OBSZARACH GÓROTWORU**

**Streszczenie.** Wieloletnia eksploatacja górnicza powoduje znaczące zmiany stanu naprężenia i odkształcenia w górotworze, które objawiają się często w postaci zjawisk dynamicznych.

Powstające pola energetyczne powodują wzrost aktywności i zagrożenia sejsmicznego, wzmożone deformacje górotworu i powierzchni terenu oraz znaczące trudności w utrzymaniu wyrobisk górnicznych.

W pracy przedstawiono wyniki analizy stanów energetycznych w dużym obszarze górotworu, w obrębie którego w latach 1988-90 wystąpiło ponad 20 tys. wstrząsów górotworu.

Analiza obejmuje lokalizację epicentrów wstrząsów na tle układu parcel dokonanej i prowadzonej eksploatacji górnicznej w aspekcie natężenia prędkości pola energetycznego uzyskanego na podstawie przyjętego modelu elementarnego impulsu energetycznego w ośrodku nieograniczonym.

## **COMPUTER AIDED MODELLING OF ENERGY STATES IN BIG AREAS OF OROGEN**

**Summary.** Many years' mining causes substantial changes of stress and strain in orogen which are often shown as dynamic phenomena. Newly created energy fields cause increase in seismic activity and hazard, intensive deformations of orogen and land surface as well as difficulties in maintenance of underground working.

This paper presents the results of the analysis of energy states in a big area of orogen. In the years 1988 - 90 over 20000 tremors occurred there. The analysis includes location of tremor epicentre against a background of a system of lots of past and current mining. It

is shown in the aspect of the rate of energy field velocity generated on the basis of the assumed model of elementary energy pulse in an unlimited medium.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ В БОЛЬШИХ ПРОСТРАНСТВАХ ГОРНОГО МАССИВА

**Резюме.** Многолетняя горная эксплуатация приводит к значительным изменениям напряженного состояния и деформации в горном массиве, которые часто проявляются в виде динамических явлений.

Образующиеся энергетические поля вызывают повышение активности и сейсмоопасности, усиление деформаций горного массива и земной поверхности, а также значительные затруднения в поддержании горных выработок.

В работе представлены результаты анализа энергетических состояний в большом пространстве горного массива, в пределах которого в 1988 - 90 гг. выступило свыше 20 тысяч горных ударов.

Анализ охватывает локализацию эпицентров горных ударов на фоне схемы участков законченной и ведущейся горной эксплуатации в аспекте увеличения скорости энергетического поля, полученного на основании принятой модели элементарного энергетического импульса в неограниченной среде.

### 1. WSTĘP

Wieloletnia eksploatacja górnicza powoduje znaczące zmiany stanu naprężenia i odkształcenia w górotworze, które objawiają się często w postaci zjawisk dynamicznych, stanowiących jeszcze jeden element oddziaływania na środowisko naturalne, jak i na warunki bezpiecznego wybierania pokładów węgla.

Systematyczny rozwój wybierania, a tym samym powiększanie się przestrzeni wyeksploatowanych w górotworze, kształtowanie się coraz bardziej złożonych układów krawędzi eksploatacyjnych, powoduje, że coraz to większe obszary górotworu charakteryzują się wzmożoną aktywnością energetyczną.

Mechanizm zjawisk zachodzących w tych warunkach w górotworze, z uwagi na jego złożoność, anizotropię, niejednorodność i nieciągłość jest znacząco trudny, a wydaje się, że nawet niemożliwy do zadowalającego opisanego przy wykorzystaniu dotychczasowych modeli, bazujących głównie na rozwiązaniach analitycznych. Z tych

względów chyba konieczne jest prowadzenie prac mających na celu próby opisu tych zjawisk, opierając się na podstawowych zasadach opisu procesów fizycznych.

## 2. BILANS ENERGII W GÓROTWORZE W ŚWIEŹLE OGÓLNYCH PRAW MECHANIKI I TERMODYNAMIKI

Na podstawie dotychczasowych analiz obserwowanych skutków eksploatacji górniczej, w szerokim tego słowa znaczeniu, można stwierdzić, że wieloletnia intensywna eksploatacja powoduje pojawienie się nowych jakościowo zjawisk deformacyjno-naprężeniowych w górotworze.

Rozwój frontu wybierania, powiększanie się przestrzeni wyeksploatowanej, kształtowanie się coraz bardziej złożonych układów krawędzi eksploatacyjnych i niewybranych części pokładów, a przede wszystkim wzrost głębokości eksploatacji powodują powstawanie charakterystycznych pól energetycznych w górotworze. Zmiany energetyczne w górotworze wywołują wzrost aktywności i zagrożenia sejsmicznego, wzmoczone deformacje górotworu i powierzchni terenu oraz trudności w utrzymaniu wyrobisk górniczych.

Rozważając bilans energii w górotworze, całkowitą energię układu można przedstawić w postaci zależności [7]:

$$E = E_k + E_p + U \quad (2.1)$$

gdzie:

$E_k$  - energia kinetyczna, zależna od prędkości ruchów elementów układu  $S$ ,

$$E_k = \frac{1}{2} \int r v^2 dV$$

$r$  - gęstość,

$v$  - prędkość ruchu elementów układu,

$V$  - objętość układu  $S$ ,

$E_p$  - energia potencjalna,

$U$  - energia wewnętrzna właściwa.

Podstawowym czynnikiem warunkującym przebieg zjawisk zachodzących w górotworze jest niejednorodność pól fizycznych. Z tego względu należy stosować miary niejednorodności pól fizycznych. I tak w przypadku pola skalarnego o równaniu:

$$w = w(x, y) \quad (2.2)$$

Zmienność wielkości fizycznej w kierunkach osi współrzędnych  $x, y$  określają pochodne:

$$\frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial w}{\partial y} \quad (2.3)$$

Sumując wektorowo powyższe pochodne, otrzymuje się wektor o postaci:

$$\text{grad } w = \bar{i} \frac{\partial w}{\partial x} + \bar{j} \frac{\partial w}{\partial y} \quad (2.4)$$

Kierunek wektora (grad  $w$ ) wyznacza kierunek największej zmiany pola skalarne, a jego wartość określa wartość największej zmiany pola skalarne w danym punkcie pola fizycznego. W przypadku gdy pole skalarne  $w$  jest jednorodne, co znaczy, że wielkość  $w$  jest w każdym punkcie danego obszaru taka sama, wówczas:

$$\text{grad } w = 0 \quad (2.5)$$

Można przyjąć, że operator różniczkowy "gradient" przypisuje dowolnemu polu skalarne  $w(x,y)$  odpowiednie pole wektorowe grad  $w$ . Dla pola skalarne przestrzennego o postaci:

$$w = w(x, y, z) \quad (2.6)$$

miarą niejednorodności jest wielkość wektora:

$$\text{grad } w = \bar{i} \frac{\partial w}{\partial x} + \bar{j} \frac{\partial w}{\partial y} + \bar{k} \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.7)$$

Niejednorodność przestrzennego pola wektorowego opisuje macierz:

$$\text{grad } \bar{w} = \begin{vmatrix} \frac{\partial w_x}{\partial x} & \frac{\partial w_x}{\partial y} & \frac{\partial w_x}{\partial z} \\ \frac{\partial w_y}{\partial x} & \frac{\partial w_y}{\partial y} & \frac{\partial w_y}{\partial z} \\ \frac{\partial w_z}{\partial x} & \frac{\partial w_z}{\partial y} & \frac{\partial w_z}{\partial z} \end{vmatrix} \quad (2.8)$$

wielkość (grad  $w$ ) zwana jest gradientem tensorowym, czyli operator różniczkowy grad przypisuje dowolnemu polu wektorowemu  $w$  pole tensorowe (grad  $w$ ). Drugą miarą niejednorodności pola wektorowego jest iloczyn skalarny "wektora" i wektora  $w$ , zwany dywergencją lub rozbieżnością pola wektorowego:

$$\operatorname{div} w = \frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \quad (2.9)$$

W przypadku pola wektorowego w ośrodku ciągłym (grad  $w$ ) określa zmianę kształtu i obrót elementów ośrodka, natomiast  $(\operatorname{div} w)$  - względną zmianę objętości elementów. Jeżeli pole jest polem jednorodnym, czyli  $w = \text{const}$ , omawiane miary niejednorodności są równe zeru, a ośrodek podlega przesunięciu bez odkształcenia, obrotu i zmiany objętości.

### 3. MODELOWANIE POLA ENERGETYCZNEGO CHARAKTERYZUJĄCEGO ENERGIĘ SEJSMICZNĄ

W celu określenia rozkładu energii kinetycznej wydzielającej się w trakcie występowania wstrząsów górotworu indukowanych prowadzoną eksploatacją górniczą można posłużyć się uproszczonym modelem opisującym wydzielanie się energii z ośrodka, w którym wystąpi jednostkowy impuls energetyczny. Zadziałanie jednostkowego impulsu wywołuje powstanie ruchu równego iloczynowi masy części ośrodka przez wektor prędkości, określane składowymi  $u$ ,  $v$ ,  $w$ .

Zakładając warunek ciągłości ruchu ośrodka, pole prędkości spełnia warunek równości całkowitej energii kinetycznej ośrodka z energią impulsu, co przedstawia zależność:

$$\frac{\rho}{2} \iiint (u^2 + v^2 + w^2) dx dy dz = Q_M, \quad (3.1)$$

gdzie:

- $u, v, w$  - składowe wektora prędkości,
- $\rho$  - gęstość ośrodka,
- $Q_M$  - energia impulsu energetycznego.

Tak więc równanie 3.1 wskazuje, że przyjmując pewne uproszczenia, możliwe jest, na podstawie znajomości energii impulsu, określenie wielkości energii kinetycznej, jaka wydzieli się w danym obszarze górotworu. Dla tego celu konieczne jest jednak określenie składowych wektora prędkości pola energetycznego górotworze. W celu

wyspecyfikowania pola energetycznego wokół pojedynczego impulsu energetycznego można rozpatrywać impuls energetyczny  $Q_M$  o promieniu  $R$  w ośrodku nieograniczonym. Tak więc dzięki symetrii wektor prędkości skierowany jest promieniowo, a jego wielkość jest pewną funkcją odległości  $r$  od środka impulsu, co można wyrazić zależnością:

$$4\pi r^2 u = M_Q, \quad (3.2)$$

gdzie:

$u$  - prędkość pola,  
 $M_Q$  - natężenie prędkości

Wykonując elementarne działania wektor prędkości analizowanego pola energetycznego można wyznaczyć z zależności:

$$u = \frac{1}{r^2} \sqrt{\frac{RQ_M}{2\pi\rho}} \quad (3.3)$$

Bilans energii w przypadku pojedynczego impulsu energetycznego posiada więc postać:

$$\int \frac{\rho u^2}{2} 4\pi r^2 dr = 2\pi r^2 dr = 2\pi\rho \int \frac{RQ_M dr}{2\pi\rho r^2} = RQ_M \int \frac{dr}{r^2} = Q_M \quad (3.4)$$

Przedstawione zależności pozwalają określić nie tylko pole prędkości wokół pojedynczego impulsu energetycznego, ale również pole energii kinetycznej na podstawie danych o położeniu i wielkości wstrząsów górotworu. Natężenie pola prędkości rozkładu energetycznego w danym przedziale czasu można wyrazić zależnością:

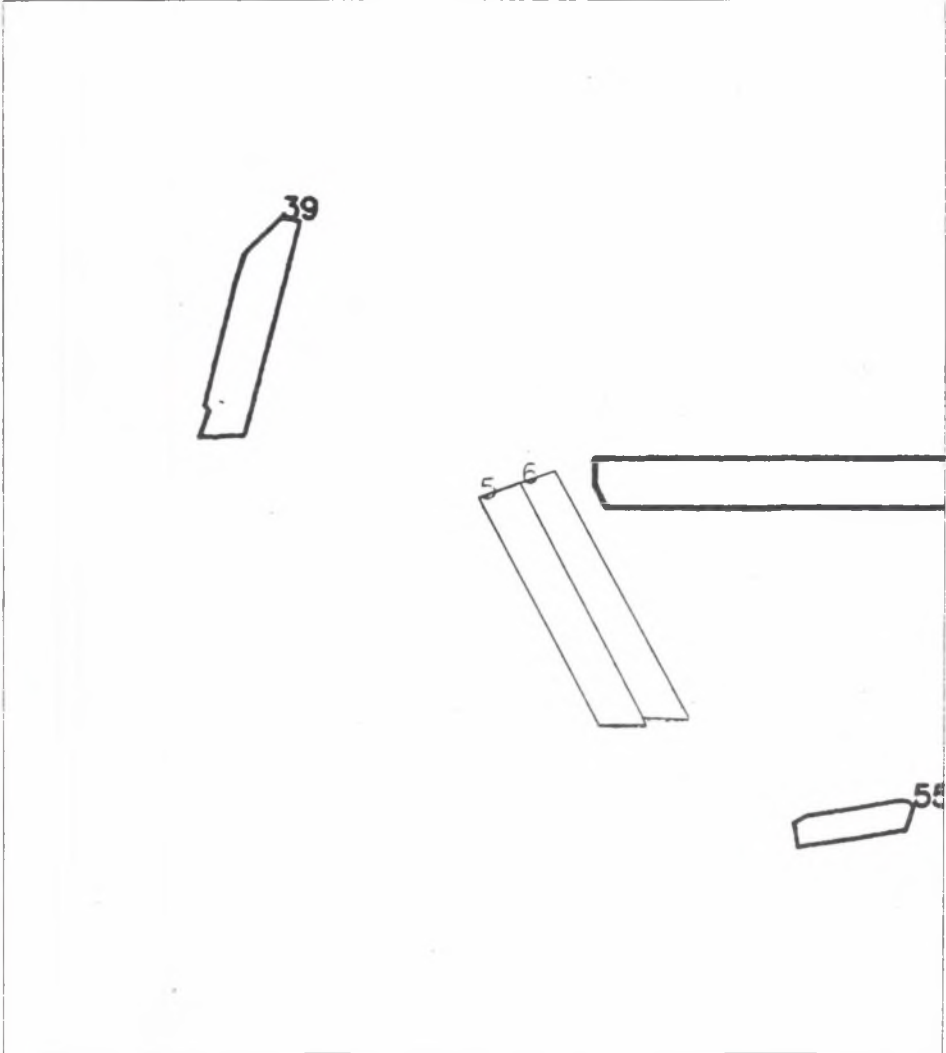
$$M_Q = \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_n^2} \sqrt{\frac{R_i Q_{Mi}}{2\pi\rho}}, \quad (3.5)$$

gdzie:

$r_i$  - odległość rozpatrywanego punktu od  $i$ -tego impulsu energetycznego  
 $Q_{Mi}$  - energia  $i$ -tego impulsu energetycznego,  
 $R_i$  - promień impulsu energetycznego.

Wykorzystując przykładowe dane o układzie parcel eksploatacyjnych (rys. 3.1 - 3.3) i wstrząsach górotworu, przedstawiono w postaci izolinii rozkładu natężenia pola energetycznego prędkości dla trzech okresów jednorocznych (rys. 3.4 - 3.6).

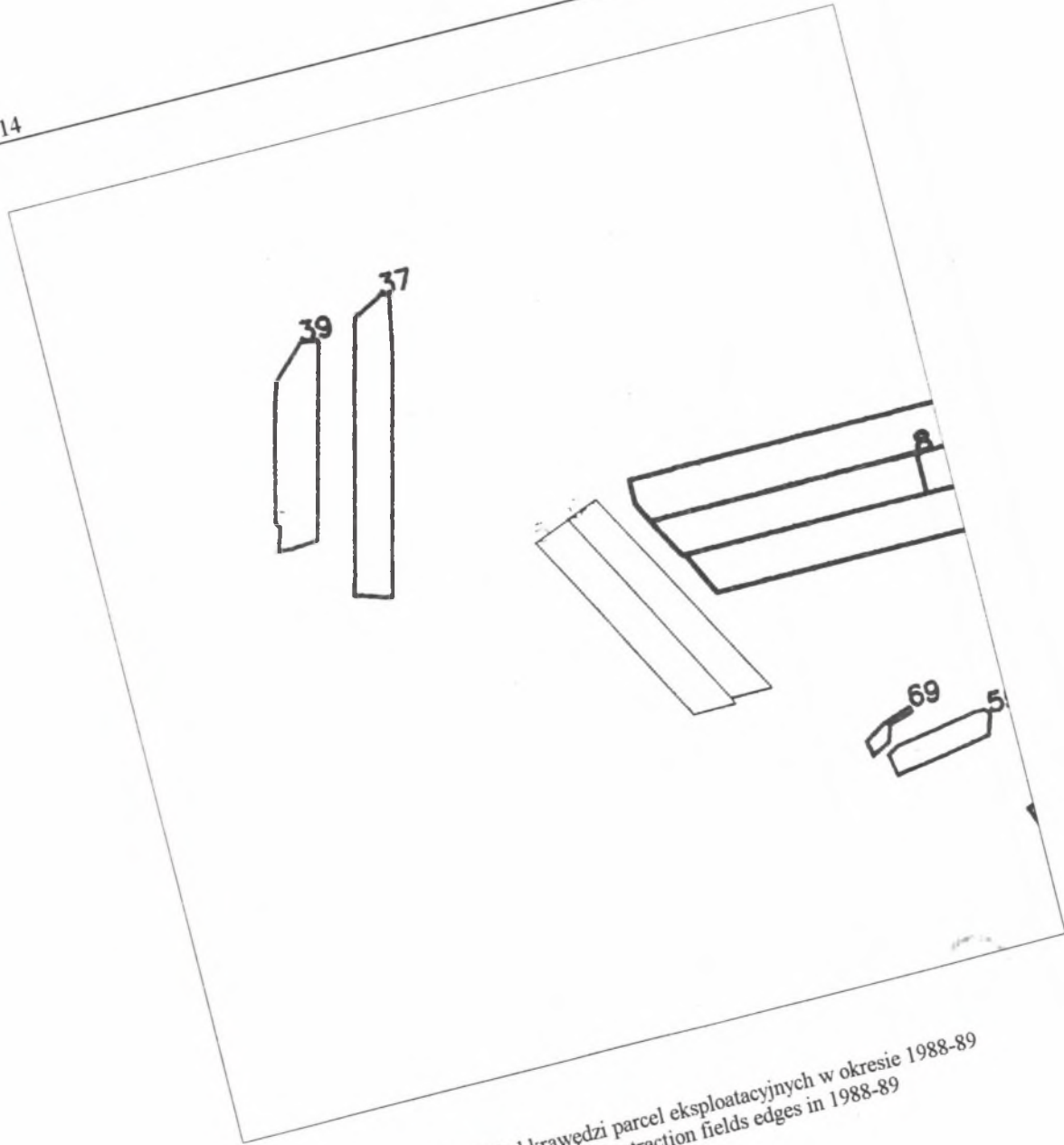
Dokonując całkowania numerycznego zgodnie ze wzorem (3.1), możliwe jest uzyskanie map rozkładu energii kinetycznej indukowanej występującymi wstrząsami górotworu.



Rys. 3.1. Układ krawędzi parcel eksploatacyjnych w roku 1988

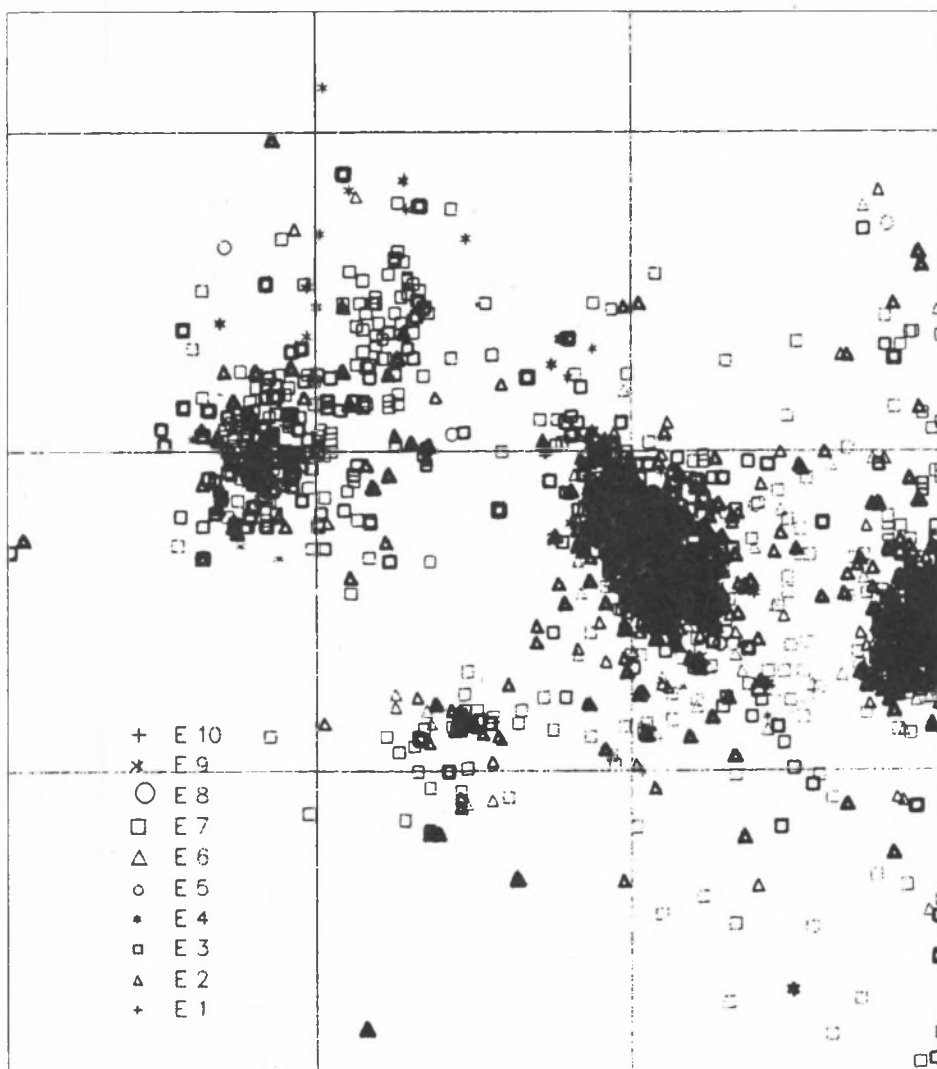
Fig. 3.1. The shape of extraction fields edges in 1988-88





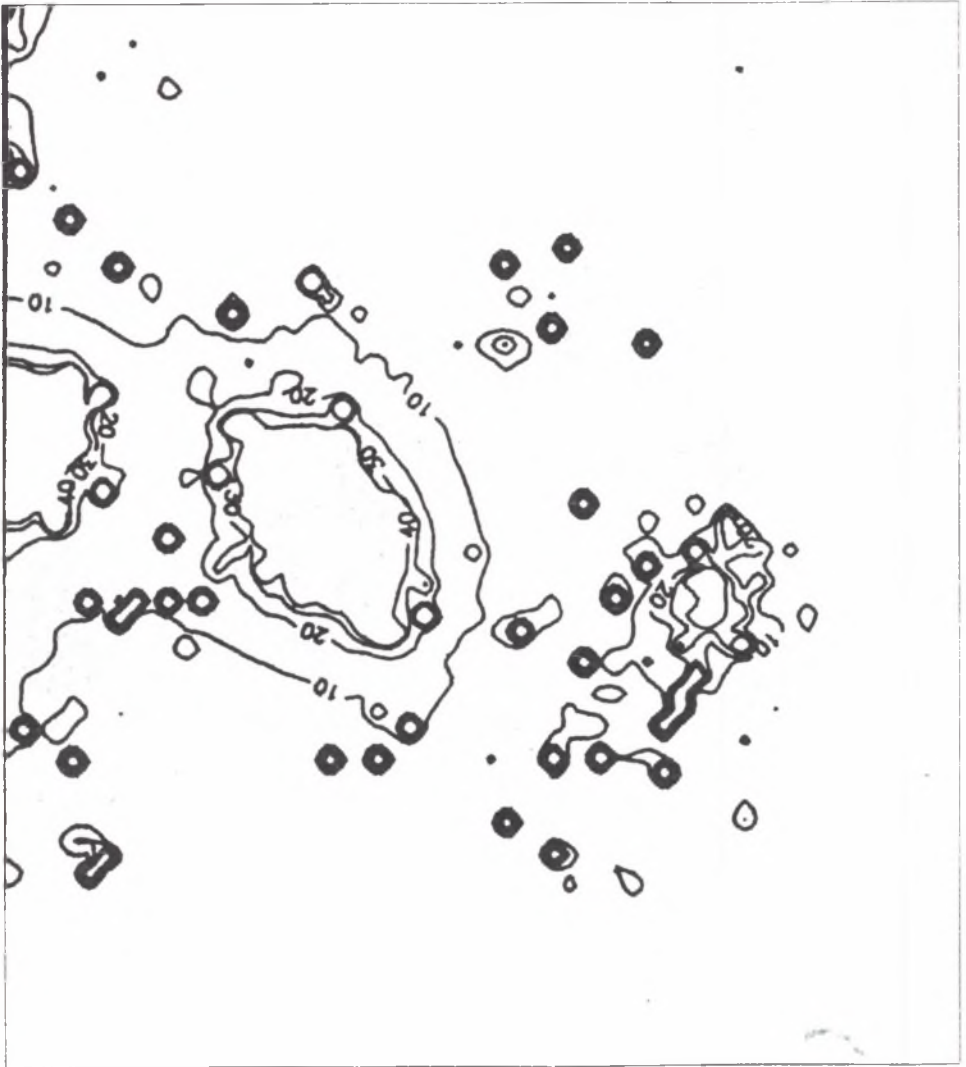
Rys. 3.2. Układ krawędzi parcel eksploatacyjnych w okresie 1988-89  
Fig. 3.2. The shape of extraction fields edges in 1988-89





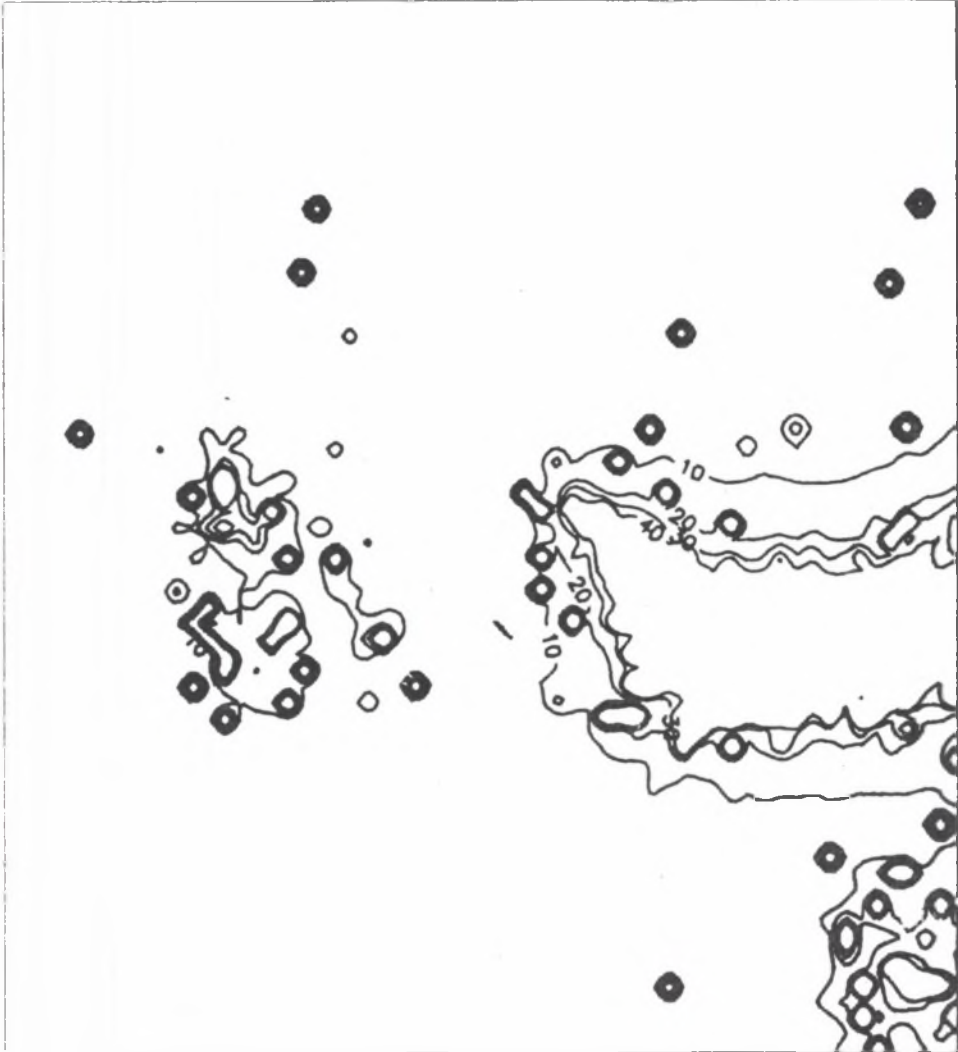
Rys. 3.3. Rozkład epicentrów wstrząsów o energii  $(1-9) \cdot 10^4$  [J] zarejestrowanych w 1988 r.

Fig. 3.3. The distribution of shock epicentres of the energy  $(1-9) \cdot 10^4$  [J] registered in 1988



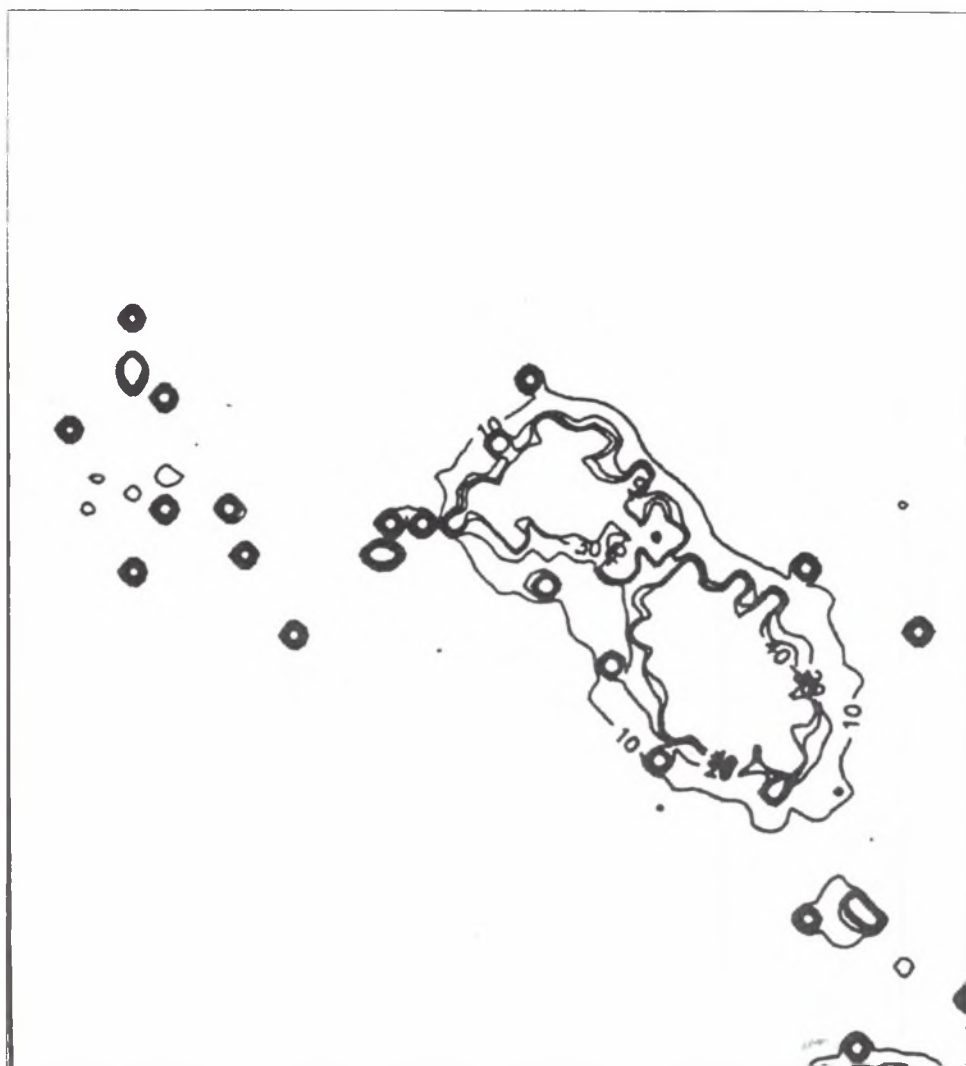
Rys. 3.4. Rozkład natężenia pola energetycznego prędkości dla roku 1988

Fig. 3.4. The distribution of intensity of the energy field of velocity in 1988-88



Rys. 3.5. Rozkład natężenia pola energetycznego prędkości dla roku 1989

Fig. 3.5. The distribution of intensity of the energy field of velocity in 1989-89



Rys. 3.6. Rozkład natężenia pola energetycznego prędkości dla roku 1990  
Fig. 3.6. The distribution of intensity of the energy field of velocity in 1990-90

#### 4. PODSUMOWANIE

Wieloletnia eksploatacja górnicza powoduje powiększanie się przestrzeni wyeksploatowanych w górotworze, kształtowanie się coraz bardziej złożonych układów krawędzi eksploatacyjnych, powodując, że coraz to większe obszary górotworu charakteryzują się wzmożoną aktywnością energetyczną. Mechanizm zjawisk zachodzących w tych warunkach w górotworze, z uwagi na jego złożoność, anizotropię, niejednorodność i nieciągłość, jest trudny do opisanie. Z tych względów celowe jest prowadzenie prac mających na celu próby opisu tych zjawisk, opierając się na podstawowych zasadach opisu procesów fizycznych.

Na podstawie przeprowadzonej przykładowej analizy rozkładu epicentrow wstrząsów górotworu można zauważyć prawidłowość wskazującą na ich szczególną koncentrację w rejonach, gdzie nie prowadzono eksploatacji. Porównując położenie epicentrow wstrząsów górotworu w odniesieniu do lokalizacji parcel eksploatacyjnych stwierdza się, że zwiększona aktywność sejsmiczna związana jest z obszarami górotworu poza parcelami prowadzonej eksploatacji górniczej, a ich położenie determinowane jest głównie zakresem dokonanej eksploatacji. Wykonane mapy położenia parcel eksploatacyjnych w poszczególnych okresach oraz rozkłady aktywności sejsmicznej wskazują na zjawisko akumulowania energii w rejonie wybranych parcel nad calizną, a oddziaływanie kolejnych eksploatowanych parcel powoduje uwalnianie tej energii.

#### LITERATURA

- [1] Chudek M.: Mechanika górotworu. Skrypt Pol. Śl., Gliwice 1981.
- [2] Dymek F.: Pewne płaskie i przestrzenne rozwiązanie teorii ośrodka ciągłego liniowo-sprężystego i ich zastosowanie w mechanice górotworu. Zeszyty Probl. Górn., t.9, z.1. 1971.
- [3] Drzęźła B.: Rozwiązanie pewnego przestrzennego zadania liniowej teorii sprężystości w zastosowaniu do prognozowania deformacji górotworu pod wpływem eksploatacji górniczej wraz z oprogramowaniem ZN. Pol. Śl. seria Górnictwo z. 91, Gliwice 1978.
- [4] Everling G., Meyer A.: Ein Gebirgsdruck-Rechenmodell als Planungshilfe. Glückauf-Forschungshefte, z.3, Essen, 1972.
- [5] Gil H.: Rozkład naprężeń i odkształceń w górotworze potraktowanym jako ośrodek sprężysto-lepki. Zeszyty Problemowe Górnictwa, PAN, t.3, z.1, 1965.
- [6] Litwiniszyn J.: Zastosowanie równań procesów stochastycznych do mechaniki górotworu. Archiwum Górnictwa, t.1, z.3, 1956.

- [7] Ryncarz T.: Fizyka górotworu. Skrypt AGH, nr 573, Kraków 1976.
- [8] Walaszczyk J.: Uproszczony model cyfrowy do analizy dużych obszarów górotworu. Mater. Konf. pt. "Metody komputerowe w mechanice", IX Konf., maj 1989.
- [9] Świtka R.: Aproksymowana półprzestrzeń sprężysta jako model podłoża sprężystego. Pol. Poznańska, Rozprawy nr 31, 1968.
- [10] Kleta H., Duży S.: Modelowanie wspomaganie komputerowo stanów energetycznych w dużych obszarach górotworu. IGBPiOP Pol. Śl., Praca własna, Gliwice 1992.

Recenzent: Prof. dr hab inż. Alfred **Biliński**

Wpłynęło do Redakcji w kwietniu 1994 r.

### **Abstract**

Many years' mining causes substantial changes of stress and strain in orogen which are often shown as dynamic phenomena. Newly created energy fields cause increase in seismic activity and hazard, intensive deformations of orogen and land surface as well as difficulties in maintenance of underground working.

This paper presents the results of the analysis of energy states in a big area of orogen. In the years 1988 - 90 over 20000 tremors occurred there. The analysis includes location of tremor epicentre against a back-ground of a system of lots of past and current mining. It is shown in the aspect of the rate of energy field velocity generated on the basis of the assumed model of elementary energy pulse in an unlimited medium.

On the basis of the shocks epicentres distribution analysis, the regularity has been shown that increased seismic activity is connected with rock mass areas outside the longwalls, and the location of shocks epicentres is mostly determined by the range of extraction. The maps of longwalls location in the particular periods of time and the distribution of seismic activity indicate, that accumulation of energy takes place in the areas of extracted parts of a coal seam above the coal solid, and the influence of the next extracted longwalls causes freeing of that energy.