ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1994
Seria: GÓRNICTWO z. 221 Nr kol. 1256

Piotr KOŁODZIEJCZYK
Instytut Eksploatacji Złóż Politechniki Śląskiej

ZASTOSOWANIE APRIORYCZNEJ INFORMACJI TYPU (R) OGRANICZEŃ W ZAGADNIENIU LOKALIZACJI WSTRZĄSÓW GÓRNICZYCH

Streszczenie. W artykule omówiono modyfikację tradycyjnych, iteracyjnych algorytmów lokalizacji poprzez wprowadzenie dodatkowej, apriorycznej informacji typu (R) ograniczeń o poszukiwanym rozwiązaniu, co po pierwsze eliminuje rozbieżność procesu iteracyjnego, a po drugie umożliwia poprawny dobór punktu startu algorytmu, a więc spełniony jest podstawowy warunek zbieżności metod newtonowskich, aby punkt startu był dostatecznie bliski rozwiązaniu.

THE APPLICATION OF AN A PRIORI INFORMATION OF (R) TYPE LIMITATIONS IN THE LOCATION OF MINING TREMORS

Summary. The article describes the modification of traditional iterative location algorithms by introducing an additional a priori information of the (R) type limitations of a desired solution which firstly, excludes iterative process divergence and secondly, allows to choose correctly the starting point of an algorithm, fulfilling thus the basic requirement for the convergence of Newtonian methods to make the starting point sufficiently approximate to the solution.

ANWENDUNG DER APRIORISCHEN INFORMATION VOM TYP (R) DER EINSCHRÄNKUNGEN IN FRAGE DER LOKALISIERUNG VON GEBRIGSSCHLÄGEN

Zusammenfassung. In dem Artikel wurde die Modifikation von herkömmlichen und iterativen Lokalisierungsalgorithmen durch die Einführung einer zusätzlichen apriorischen Information vom Typ (R) der Einschränkungen der gesuchten Lösung erörtet, was erstens die Divergenz des Iterationsprozesses eliminiert, und zweitens die richtige Auswahl des Algorithmus-Startpunktes ermöglicht, wodurch die grundlegende Bedingung der Konvergenz der Newtonschen Methoden erfüllt wird, die besagt, daß der Startpunkt genügend nahe der Lösung sein soll.

1. WSTĘP

Zadanie lokalizacji ognisk wstrząsów górniczych najczęściej obecnie rozwiązywane jest na podstawie rejestracji czasów pierwszego wejścia fali podłużnej P przez zespół sejsmometrów rozmieszczonych w strukturze wyrobisk kopalni.

O popularności tej metody, zwanej metodą P, zadecydowały głównie jej zalety:

- relatywnie najmniejszy błąd odczytu czasu pierwszego wejścia w stosunku do identyfikacji czasu wejścia innych typów fal (np. fali poprzecznej S),
- możliwość automatycznej detekcji czasu wejścia, a w ślad za tym możliwość komputeryzacji całego procesu lokalizacji.

Algorytmy lokalizacji bazujące na tej metodzie mogą również wykorzystywać czasy wejść innych grup falowych, ale - jak już wspomniano - z uwagi na mniejszą dokładność identyfikacji równania otrzymane dla tych grup falowych mogą mieć tylko znaczenie pomocnicze i należy je stosować jedynie w połączeniu z równaniami dla fali P - Drzęźla (1993).

Układ nieliniowych równań stacyjnych jest z reguły układem nadokreślonym, tzn. układem, w którym liczba równań jest większa od liczby niewiadomych. Z uwagi na błędy w danych i zawsze nieadekwatny do rzeczywistości założony model propagacji fal sejsmicznych jest to układ sprzeczny. Z tego względu zadanie rozwiązania układu równań stacyjnych sprowadza się najczęściej do nieliniowego bądź liniowego zadania najmniejszych kwadratów. Zaletą takiego sposobu jest możliwość wykorzystania informacji zawartej w każdym równaniu stacyjnym, a wadą o szczególnym znaczeniu to, że często funkcja kryterialna posiada więcej niż jedno minimum.

Zadanie lokalizacji ognisk wstrząsów górniczych najczęściej rozwiązywane jest:

- w sposób efektywny poprzez algebraiczną linearyzację nieliniowego układu równań stacyjnych-Inglada (1928), Drzęźla, Mendecki (1982),
- iteracyjnie na bazie metod programowania nieliniowego, przy czym z uwagi na różniczkowalność funkcji kryterialnej najczęściej stosowana jest wielowymiarowa metoda Newtona.

W pierwszym przypadku znacznemu pogorszeniu ulega uwarunkowanie zadania lokalizacji [Drzęźla (1992)], w drugim natomiast, wielość poszukiwanych parametrów komplikuje postać funkcji celu, co stwarza duże trudności numeryczne i często jest przyczyną zbieżności procesu iteracyjnego do minimum lokalnego (fałszywego) lub równie często rozbieżności tego procesu

- Kornowski (1989). Występowanie minimów lokalnych stwarza sytuację, w której nie możemy być pewni poprawności uzyskanego numerycznie rozwiązania, gdyż uzależnione ono jest od przyjętego punktu początkowego (punktu startu algorytmu iteracyjnego) - Fortuna i in. (1982).

Jedyną możliwością uzyskania, w takim przypadku, stabilnego rozwiązania układu równań stacyjnych jest wprowadzenie pewnej dodatkowej, apriorycznej informacji o szukanym rozwiązaniu.

2. REGULARYZACJA ALGORYTMU INFORMACJĄ TYPU (R) OGRANICZEŃ

Lokalna zbieżność metody Newtona oraz nieuniknione błędy w danych mogą powodować dowolnie duże zaburzenie rozwiązania (zbieżność do minimum lokalnego lub rozbieżność procesu iteracyjnego). Stosowane różne modyfikacje metody Newtona (powiększenie promienia zbieżności, tłumienie kroku poprawki, start w kolejnym kroku iteracyjnym z punktu minimum na kierunku poprawy) nie eliminują powyższej niedogodności. Kornowski (1989) w swoich badaniach stwierdził, że już w najprostszych modelach funkcja kryterialna charakteryzuje się występowaniem minimów lokalnych położonych w wydłużonych i płaskich wąwozach. Jednocześnie proponuje on rozwiązać zadanie lokalizacji poprzez zbadanie wszystkich minimów, a rozwiązanie właściwe przypisać punktowi, w którym funkcja kryterialna osiąga minimum globalne.

Problem ten nabiera znaczenia, zwłaszcza w przypadkach nieoptymalnych planów eksperymentu, tj. w przypadkach lokalizacji wstrząsów zewnętrznych, w stosunku do sieci sejsmometrów lub lokalizacji hipocentrów wstrząsów przez sieci płaskie.

Z matematycznego punktu widzenia oznacza to, że istnieje bardzo duży, w sensie metryki przestrzeni rozwiązań R^n, zbiór ϕ_ε dopuszczalnych rozwiązań $\mathbf{x}^*$ spełniających układ równań stacyjnych w sensie nieliniowego zadania najmniejszych kwadratów, dla wektorów danych $\mathbf{b}$ różniących się nie więcej niż o (średni błąd danych) od zaobserwowanego wektora danych $\mathbf{b}_0$:

$$\Phi_\varepsilon = \{x^* : x^* = \min \|b - F(x)\|; \quad \|b - b_0\| \le \varepsilon\} \tag{1}$$

$$\sup_{x_1^*, x_2^* \in \Phi_\varepsilon} \|x_1^* - x_2^*\| = \Phi$$

gdzie Φ jest na tyle dużą liczbą, że wyznaczone rozwiązanie:

$$x^* = \min ||b_0 - F(x)|| \tag{2}$$

traci sens praktyczny, ponieważ jego wartość wynikać może z przypadkowego układu danych pomiarowych $\mathbf{b}_0$.

W takim przypadku jedyną możliwością uzyskania stabilnego rozwiązania jest regularyzacja algorytmu lokalizacji poprzez wprowadzenie dodatkowej, apriorycznej informacji o szukanym rozwiązaniu $\mathbf{x}^*$. Ta dodatkowa, znana niejako wcześniej, informacja może mieć charakter:

- Apriorycznej informacji typu (P) - probabilistycznej. Polega ona na wprowadzeniu w przestrzeni rozwiązań pewnej miary probabilistycznej określającej gęstość prawdopodobieństwa zaobserwowania rozwiązania w danym punkcie przestrzeni rozwiązań. Sposób ten zwany jest również Bayesowskim.
- Apriorycznej informacji typu (R) ograniczeń. Polega ona na wprowadzeniu ograniczenia w zbiorze ϕ_ε poprzez podanie mniejszego zbioru $\phi^R_\varepsilon \subset \phi_\varepsilon$. Najczęściej jest to pewne ograniczone otoczenie najbardziej prawdopodobnego rozwiązania.

Pierwszą z prezentowanych strategii połączenia informacji obiektywnej, znanej z pomiarów czasów rejestracji fali sejsmicznej, z informacją a priori o położeniu ogniska wstrząsu, w stosunku do lokalizacji pojedynczego wstrząsu i znanego parametru modelu, przedstawił Kijko (1987). Natomiast algorytm rozwiązania w stosunku do grupy wstrząsów i nieznanych parametrów modelu, na bazie teorii estymacji Bayesa, przedstawili Kijko i Pirhonen (1988). Możliwość regularyzacji procesu lokalizacji zjawisk sejsmicznych poprzez efektywne wykorzystanie apriorycznej informacji typu ograniczeń wynika bezpośrednio z faktu znajomości sekwencji czasów rejestracji wstrząsu i geometrii sieci sejsmometrów.

W celu przedstawienia istoty takiej informacji załóżmy, że wszystkie stanowiska sejsmometrów oraz ognisko wstrząsu położone są w jednej płaszczyźnie.

Obszar ω, w którym wystąpił wstrząs, jest podzbiorem pewnego skończonego zbioru Ω (najczęściej obszaru górniczego kopalni). Zbiór Ω zawiera wszystkie stacje sejsmometryczne, a jego brzeg $d\Omega$ jest wielobokiem wypukłym. Przyjmijmy, że numeracja stanowisk sejsmometrów jest zgodna z kolejnością rejestracji docierających do nich fal sejsmicznych.

Jeśli sejsmometry oznaczone numerami $i<j$ ($t_i < t_j$) połączymy odcinkiem i w połowie jego długości przeprowadzimy prostą prostopadłą do niego, dzielącą obszar na dwie części,

wówczas ognisko wstrząsu sejsmicznego musi należeć do tej części obszaru $\Omega_{ij} \in \Omega$, która zawiera i-ty sejsmometr. Powtarzając wskazane operacje dla wszystkich j > i dostaniemy obszar:

$$\Omega_i = \prod_{j=i+1}^{s} \Omega_{ij} \tag{3}$$

który na pewno zawiera ognisko wstrząsu.

Obszar

$$\omega = \prod_{i=1}^{s-1} \Omega_i \tag{4}$$

jest najmniejszym ze zbiorów, do którego musi należeć ognisko wstrząsu sejsmicznego. Jego brzeg $d\omega$ stanowi wielobok wypukły i potrafimy go wyznaczyć analizując kolejność pojawiających się impulsów sejsmicznych na poszczególnych sejsmometrach.

Analogiczną konstrukcję możemy wykonać w przestrzeni, w wyniku czego uzyskamy wypukły wielościan ograniczający obszar potencjalnie możliwych hipocentrów wstrząsów górotworu scharakteryzowanych tą samą sekwencją rejestracji fal sejsmicznych. Równania algebraiczne płaszczyzn zawierających poszczególne ściany tego wielościanu stanowią zatem liniowe ograniczenia nierównościowe w zadaniu programowania nieliniowego z ograniczeniami. Liczba tych ograniczeń wynosi $\binom{s}{2}$, a dowolny punkt, (x_o, y_o, z_o) może być przyjęty jako początkowe przybliżenie współrzędnych ogniska wstrząsu - Kołodziejczyk (1992).

2.1. Przykład zastosowania

Celem zobrazowania poniższego przykładu załóżmy, że ognisko modelowanego wstrząsu (x_o=500 m, y_o =500 m) znajduje się na poziomie płaskiej sieci sejsmometrów, a lokalizacja jego epicentrum zachodzi w ośrodku jednorodnym i izotropowym. Obszar górniczy kopalni ograniczony jest kwadratem o boku 10000 m, wewnątrz którego znajduje się s (s=4) stanowisk sejsmometrów. Ich współrzędne wynoszą: S_1(x=500 m, y=700 m), S_2(x=1000 m, y=0 m), S_3(x=-1000 m, y=500 m), S_4(x=1000 m, y=2500 m).

Ilustrację powyższych założeń na tle mapki izolinii funkcji kryterialnej:

$$\delta(t_0) = \sum_{j=1}^{s} (\varphi_j - t_j)^2 \tag{5}$$

przedstawia rysunek 1a.

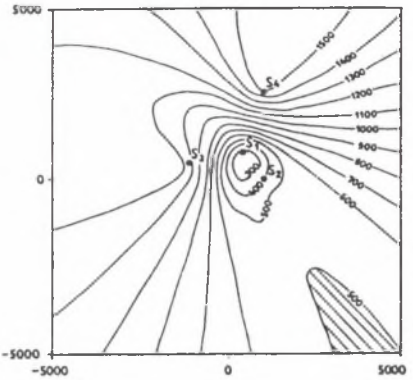
Można wyraźnie zauważyć obszar minimum właściwego (x_o = 500 m, y_o = 500 m) oraz obszar minimum lokalnego (strefa zakreskowana, prawy dolny narożnik rysunku).

Jeśli teraz, w procesie lokalizacji wykorzystana zostanie informacja a priori o wstrząsie, wynikająca z sekwencji czasów jego rejestracji (np. $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$), to oprócz znacznego ograniczenia przestrzeni poszukiwanych parametrów ogniska możemy bardzo poprawnie założyć ich początkowe przybliżenie (punkt startu algorytmu iteracyjnego).

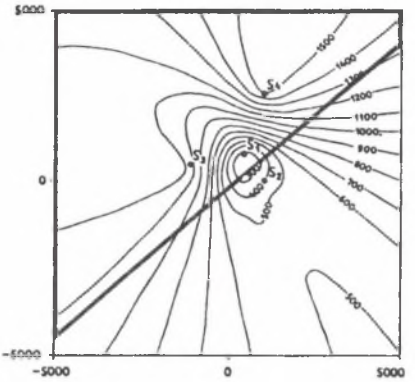
Kolejne fazy ograniczania obszaru poszukiwanego ogniska wstrząsu ilustrują rysunki 1b do 1g.

Metoda lokalizacji zjawisk sejsmicznych bazująca na połączeniu dwóch typów informacji - apriorycznej wynikającej z sekwencji czasów rejestracji wstrząsu z informacją zawartą w przeprowadzonych pomiarach, może być wykorzystana bardzo efektywnie. Niemniej wprowadzenie informacji a priori do algorytmu iteracyjnego nie powinno być stosowane bezkrytycznie. Informacja ta charakteryzuje się dużą "mocą", tzn. zasadniczo ogranicza obszar poszukiwania minimum funkcji kryterialnej. Niewłaściwa informacja a priori zdecydowanie zmienia obszar ograniczenia, a wynik lokalizacji jest kompromisem pomiędzy składową informacji reprezentowaną przez czasy rejestracji wstrząsu i składową wynikającą z błędnej informacji typu ograniczeń. Efekt wprowadzenia fałszywej informacji tego typu (np.$t_2<t_1<t_3<t_4$) dla omawianego przykładu ilustruje rysunek 2. Analiza wartości funkcji kryterialnej w wyróżnionym obszarze wykazuje, że proces iteracyjny, w zależności od założonego punktu startu, może rozwiązanie przypisać do minimum lokalnego (strefa zakreskowana) bądź też umiejscowić je na granicy obszaru ograniczonego (na rys. 2 w pobliżu minimum globalnego).

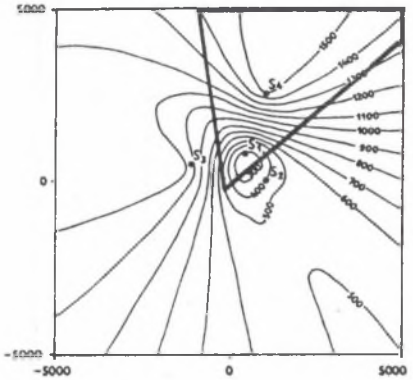
Przytoczony przykład wskazuje, że wprowadzenie niepewnej czy też wątpliwej informacji a priori o wstrząsie niejako z góry skazuje zadanie lokalizacji na niepowodzenie.



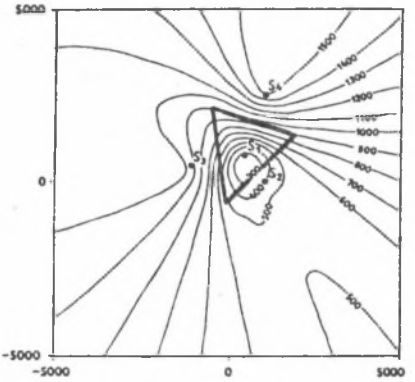
Rys. 1a.
Fig. 1a.



Rys. 1b.
Fig. 1b.



Rys. 1c.
Fig. 1c.



Rys. 1d.
Fig. 1d.

Rys. 1a. Plan warstwicowy funkcji kryterialnej (5) oraz geometria stanowisk pomiarowych

Fig. 1a. The contour plan of a criterial function (5) and geometry of measuring positions

Rys. 1b. Faza I. Ograniczenie obszaru poszukiwania ogniska wstrząsu wynikające z sekwencji czasów rejestracji wstrząsu $t_1 < t_2$. Linią pogrubioną oznaczono obszar rozwiązań dopuszczalnych

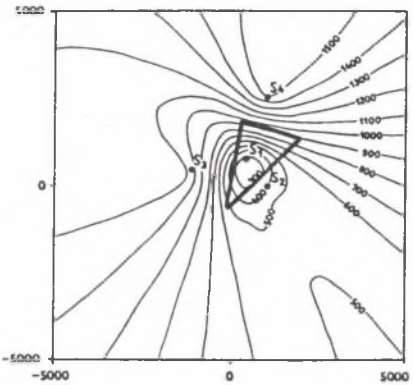
Fig. 1b. Stage I. Confinement of the area where tremor source is sought for as a result of the sequence of arrival times $t_1 < t_2$. The area of acceptable solutions has been marked with a heavy line

Rys. 1c. Faza II. Ograniczenie obszaru poszukiwania ogniska wstrząsu wynikające z sekwencji czasów rejestracji wstrząsu $t_1 < t_3$

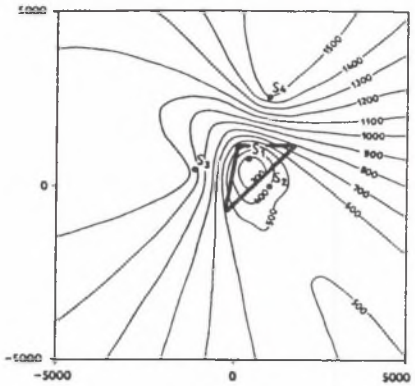
Fig. 1c. Stage II. Confinement of the area where tremor source is sought for as a result of the sequence of arrival times $t_1 < t_3$

Rys. 1d. Faza III. Ograniczenie obszaru poszukiwania ogniska wstrząsu wynikające z sekwencji czasów rejestracji wstrząsu $t_1 < t_4$

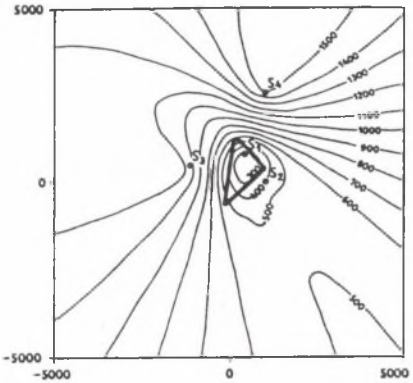
Fig. 1d. Stage III. Confinement of the area where tremor source is sought for as a result of the sequence of arrival times $t_1 < t_4$



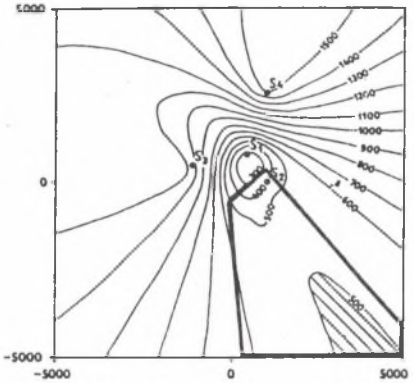
Rys. 1e.
Fig. 1e.



Rys. 1f.
Fig. 1f.



Rys. 1g.
Fig. 1g.



Rys. 2.
Fig. 2.

Rys. 1e. Faza IV. Ograniczenie obszaru poszukiwania ogniska wstrząsu wynikające z sekwencji czasów rejestracji wstrząsu $t_2 < t_3$

Fig. 1e. Stage IV. Confinement of the area where tremor source is sought for as a result of the sequence of arrival times $t_2 < t_3$

Rys. 1f. Faza V. Ograniczenie obszaru poszukiwania ogniska wstrząsu wynikające z sekwencji czasów rejestracji wstrząsu $t_2 < t_4$

Fig. 1f. Stage V. Confinement of the area where tremor source is sought for as a result of the sequence of arrival times $t_2 < t_4$

Rys. 1g. Faza VI. Ograniczenie obszaru poszukiwania ogniska wstrząsu wynikające z sekwencji czasów rejestracji wstrząsu $t_3 < t_4$. Wnętrze obszaru oznaczone linią pogrubioną stanowi finalne ograniczenie przestrzeni parametrów modelowanego ogniska

Fig. 1g. Stage VI. Confinement of the area where tremor source is sought for as a result of the sequence of arrival times $t_3 < t_4$. The interior of the area marked with a heavy line constitutes a final confinement of an area of the parameters of thee modelled source

Rys. 2. Finalne ograniczenie obszaru poszukiwania ogniska wstrząsu wynikające z błędnie przyjętej sekwencji czasów rejestracji (np. $t_2 < t_1 < t_3 < t_4$)

Fig. 2. Final confinement of seeking a tremor source area resulting from an incorrectly assumed sequence of arrival times (eg. $t_2 < t_1 < t_3 < t_4$)

2.2. Modyfikacja algorytmu

Oczywiste jest, że w wielu przypadkach lokalizacji wstrząsów obszar dopuszczalnych rozwiązań ze względu na (x_o, y_o, z_o) nie będzie tak skutecznie ograniczony jak w przedstawionym przykładzie (tzn. wyłącznie przez liniowe ograniczenia nierównościowe). Często elementem brzegu $d\Omega$ tego obszaru jest część brzegu $d\Omega$ zbioru Ω, a więc stosunkowo duża jest objętość przestrzeni poszukiwanego iteracyjnie hipocentrum wstrząsu.

Wynika z tego, że losowo przyjęte składowe $(x_o^{(0)}, y_o^{(0)}, z_o^{(0)}) \in \omega$ wektora $\mathbf{x}^{(0)}$ mogą być przyczyną znacznego oddalenia punktu startu algorytmu $(\mathbf{x}^{(0)})$ od rozwiązania właściwego $\mathbf{x}^*$.

Pierwsza modyfikacja algorytmu dotyczy właśnie wyboru punktu startu, a ściślej mówiąc określenia początkowego przybliżenia współrzędnych hipocentrum lokalizowanego wstrząsu.

Załóżmy, że numeracja stanowisk sejsmometrów jest zgodna z sekwencją czasów rejestracji fali sejsmicznej (np. $S_1, S_2, \ldots, S_s$). Jeśli losowo przyjęte wartości $(x_o^{(0)}, y_o^{(0)}, z_o^{(0)})$ będą generowane z wnętrza kuli o środku w punkcie (S_1) i promieniu równym połowie długości odcinka (S_1S_2) i jednocześnie będą spełnione wszystkie liniowe ograniczenia nierównościowe $(x_o^{(0)}, y_o^{(0)}, z_o^{(0)}) \in \omega$, to tak dobrany punkt startu $\mathbf{x}^{(0)}$, ze względu na współrzędne ogniska wstrząsu, będzie dobrym przybliżeniem rozwiązania najbardziej prawdopodobnego.

Druga modyfikacja dotyczy lokalizacji zjawisk sejsmicznych zewnętrznych w stosunku do obszaru Ω. W takim przypadku algorytm obliczeń, realizujący klasyczną formułę ograniczenia przestrzeni rozwiązań, przypisze poszukiwane rozwiązanie (hipocentrum wstrząsu) do punktu $\mathbf{P} \in (d\Omega \cap \omega)$ będącego elementem brzegu zbioru Ω i jednocześnie elementem obszaru rozwiązań dopuszczalnych ω.

Oczywiste jest, że wtedy założona dokładność obliczeń z reguły nie będzie spełniona, a otrzymany wynik odległy od rozwiązania właściwego. Ten niekorzystny efekt, wywołany wprowadzoną aprioryczną informacją typu (R) ograniczeń, wystąpi zawsze nawet w przypadku, gdy tradycyjny algorytm Newtona daje poprawne rozwiązanie.

Wadę tę można łatwo usunąć. Przyjmijmy, że zbiór Ω wynika z ograniczenia przestrzeni R^n warunkami w postaci:

$$l_k \le x_k \le u_k \qquad (k = 1, 2, \ldots, n) \tag{6}$$

gdzie: l_k i u_k są stałymi.

Załóżmy teraz, że poszukiwane rozwiązanie, w i-tym kroku iteracyjnym, należy do brzegu

$d\Omega$ i jest rozwiązaniem dopuszczalnym, a ściślej mówiąc - k-ty element wektora $\mathbf{x}^{(i)}$ spełnia równość:

$$\mathbf{x}_k^{(i)} = l_k \quad \text{lub} \quad \mathbf{x}_k^{(i)} = u_k$$

Wówczas powiększając odpowiednio zbiór Ω, zgodnie z relacją:

$$l_k \Leftarrow l_k - \beta l_k \quad \text{lub} \quad u_k \Leftarrow u_k + \beta u_k \quad (0 < \beta < 1) \tag{7}$$

i przyjmując rozwiązanie $\mathbf{x}^{(i)}$ jako przybliżenie początkowe dla następnego kroku iteracyjnego, możemy wyeliminować opisaną niedogodność. Sposób ten umożliwia wstępne zawężenie obszaru Ω, z uwagi na (x_o, y_o, z_o), np. do rozmiarów sieci sejsmometrów. Omawiany problem występuje również w algorytmach z aprioryczną informacją typu (P), tzn. przyjęcie zbyt optymistycznej informacji o położeniu ogniska wstrząsu (zawartej w macierzy kowariancji charakteryzującej rozmiar rejonu możliwego wystąpienia zjawiska) prowadzi do błędnego wyniku lokalizacji.

3. PODSUMOWANIE.

Przedstawiona powyżej metoda wykorzystania apriorycznej informacji typu (R) ograniczeń, wynikającej z sekwencji czasów rejestracji wstrząsu, pozwala z dużą dokładnością założyć punkt startu algorytmu iteracyjnego. Początkowe przybliżenie poszukiwanego rozwiązania znajdujące się wewnątrz wyznaczonego obszaru dopuszczalnych rozwiązań spełnia podstawowy wymóg metod newtonowskich, tj. zapewnia zbieżność procesu iteracyjnego do rozwiązania najbardziej prawdopodobnego. W praktyce górniczej, gdzie zdecydowana większość wstrząsów koncentruje się w znanych rejonach kopalni dobrze obserwowanych przez poprawnie skonstruowane sieci sejsmometrów, można przypuszczać, że zaproponowana metoda regularyzacji spełniać będzie swoje zadanie. W wielu wypadkach sama informacja zawarta w sekwencji czasów rejestracji zjawiska umożliwia szybko i efektywnie oszacować rejon wystąpienia wstrząsu.

LITERATURA

[1] Drzęźla B., Mendecki A.: Joint hypocentre location of mining tremors and determination of anisotropy parameters P-wave velocity. Acta Geophysica Polonica, vol. 30, no 4, 321-333, 1982.

[2] Drzęźla B.: Teoretyczne i praktyczne zasady oceny błędów lokalizacji ognisk wstrząsów oraz projektowania sieci sejsmometrów. Mat. III Szkoły Geofizyki Górniczej nt. "Emisja sejsmoakustyczna w skałach". Śląskie Wyd. Techn., s. 126-141, Katowice 1992.

[3] Drzęźla B.: Warunki niejednoznaczności zadania lokalizacji ognisk wstrząsów i niektóre aspekty praktyczne z nią związane. Materiały Szkoły Eksploatacji Podziemnej 1993 zorg. przez Centrum Podstawowych Problemów Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią, PAN w Krakowie, Ustroń 1-5.03.1993.

[4] Fortuna Z., Macukow B., Wąsowski J.: Metody numeryczne. WNT, Warszawa 1982, 149-150.

[5] Inglada V.: Die Berechnung der Herdkoodinated eines nahbebens aus den Eintrittszeiten der in einigen benachbarten Stationen auf Gezeichnenten P-order P-Wellen. Gerlands Beiträge zur Geophysik 19, 73-98, 1928.

[6] Kijko A.: Zastosowanie Bayesowskiej teorii estymacji do lokalizacji kopalnianych zjawisk sejsmicznych. Przegląd Górniczy no 6, 6-10, 1987.

[7] Kijko A., Pirhonen S.: Bayesian inversion of seismic travel times for simultaneous determination of hypocenter and structure parameters. University of Helsinki, Institute of Seismology, Report S-20, 1988.

[8] Kołodziejczyk P.: Geometryczna metoda lokalizacji hipocentrów zjawisk sejsmicznych. Praca o symbolu BW-719/RG-6/92, Pol. Śl. Wydz. Górn. i Geol., 1992.

[9] Kornowski J.: Lokalizacja ognisk wstrząsów - podstawy i problemy. Prace GIG, Wybrane zagadnienia ..., Katowice 1989.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. W. M. ZUBEREK

Wpłynęło do Redakcji w kwietniu 1994 r.

Abstract

The presented above method of the application of a priori information of (R) type limitations resulting from the sequence of tremor arrival times allows to assume with a big accuracy the starting point of the iterative algorithm. The preliminary approximation of the solution sought, within a determined range of acceptable solutions, meets the basic requirement of the Newtonian methods, i.e. assures the iterative process convergence with the most probable solution. In the mining practice, where a substantial minority of tremors concentrates in the well-known parts of the mine, well-observed by correctly constructed seismometer networks, it can be supposed that the suggested regularization method will fulfill its task. In many cases, the information itself included in the sequence of the event arrival times allows to identify quickly and efficently a potential tremor area.