Zeszyty Naukowe

Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią
Polskiej Akademii Nauk

rok 2017, nr 101, s. 217–228

Jerzy DEC*, Kamil CICHOSTĘPSKI**

Szacowanie zasobów złoża siarki na podstawie badań sejsmicznych

Streszczenie: Wyniki wieloletnich badań sejsmicznych przeprowadzonych na obszarze kopalni siarki Osiek pozwoliły na określenie zależności ilościowych pomiędzy amplitudą sygnału sejsmicznego rejestrowanego od stropu złoża a parametrami złoża takimi jak porowatość i procentowa zawartość siarki.

W prezentowanym artykule omówiono podstawowe zależności ilościowe pomiędzy tymi parametrami oraz metodologię wykorzystania tych związków dla potrzeb wstępnego szacowania zasobów. Ze wstępnym szacowaniem zasobów wiąże się problem poprawnej estymacji zawartości siarki oraz dokładnego określenia miąższości złoża. Autorzy przedstawiają sposób estymacji zawartości siarki oparty na bogatej statystyce właściwości złoża uzyskanej na podstawie danych geofizyki otworowej. Wskazują też, że decydującym parametrem wpływającym na ocenę zasobności jest dokładne poprowadzenie granicy spągu złoża, a to jest możliwe jedynie na podstawie poprawnego dowiązania zapisu sejsmicznego do danych geofizyki otworowej.

Przedstawiono także metodykę prowadzenia badań polowych i przetwarzania danych sejsmicznych w aspekcie odwzorowania rzeczywistych amplitud sygnału rejestrowanego od stropu złoża. Problem odwzorowania poprawnych wartości amplitud ma tu bowiem kapitalne znaczenie dla określenia realnych związków pomiędzy właściwościami złoża a dynamiką zapisu sejsmicznego. Autorzy wskazują, że podstawowa, zaobserwowana zależność wiąże amplitudę sygnału odbitego od stropu złoża ze średnią porowatością złoża. Dla potrzeb ilościowej oceny porowatości rejestrowane amplitudy sygnału muszą być kalibrowane do wartości współczynnika odbicia na stropie złoża. Właściwa kalibracja możliwa jest poprzez skorelowanie danych sejsmicznych z danymi otworowymi, takimi jak gęstość ośrodka i prędkość propagacji fali podłużnej *P*. Dzięki stwierdzonym w danym otworze wartości tych parametrów wyliczana jest wartość współczynnika odbicia (refleksyjności), a następnie wartości amplitud sygnału sejsmicznego są skalowane do wartości refleksyjności.

Uzyskiwane wyniki szacowania zasobności autorzy przedstawiają na przykładzie rezultatów uzyskanych wzdłuż wybranego refleksyjnego profilu sejsmicznego wykonanego na terenie kopalni siarki w Osieku.

Słowa kluczowe: porowatość, zawartość siarki, amplituda sygnału, zasobność

* Dr hab. inż., ** Dr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków.

Estimation of sulphur deposit resources on the basis of seismic data

Abstract: The results of long-term seismic surveys conducted in the field of the Osiek Sulphur Mine allowed the quantitative relationship between seismic signal amplitude recorded from the top of the deposit and the petrophysical parameters such a porosity and percentage sulphur content to be determined.

The basic quantitative relationships between those parameters and methodology of their usage for the purposes of the initial estimation of sulphur resources was described in this paper. An initial estimation of deposit resources is related to the problem of the correct estimation of sulphur content and the precise determination of the deposit thickness. The authors present a method of estimating sulphur content based on the rich statistics of deposit parameters obtained from the well logs data. It is indicated that the decisive parameter influencing the sulphur assessment is the exact interpretation of the deposit top boundary. This is only possible based on proper seismic to well tie.

The methodology of conducting land survey and processing of seismic data is presented in aspects of relative amplitude preservation of the signal recorded from the deposit top. The problem of relative amplitude processing is an important task for estimating the real relationships between deposit parameters and seismic signals. The authors indicate that the basic relationship connects the reflection amplitude from the top of the deposit with an average porosity of the deposit. For the quantitative interpretation of porosity, recorded signal amplitudes must be calibrated with reflection coefficients of the deposit top. Proper calibration is possible by correlating seismic data with well log data such as bulk density and P-wave velocity. On the basis of well logging in the given wellbore, the reflection coefficient (reflectivity) is calculated and then signal amplitudes are scaled to the reflectivity values.

The authors demonstrate the obtained results of estimating resource deposits by the example of the seismic profile recorded in the area of the Osiek Sulphur Mine.

Keywords: porosity, sulphur content, wavelet amplitude, resources

Wprowadzenie

Eksploatacja siarki złoża w Osieku prowadzona jest metodą otworową Frasha – metodą podziemnego wytopu. Przy miąższości złoża dochodzącej do 30 m i zawartości siarki sięgającej do 20% pełne wyeksploatowanie złoża prowadzi do istotnych zmian w obrębie warstwy złożowej, osiadania powierzchni stropu złoża i utworów nadkładu, a osiadanie osiąga wartość kilku metrów.

Badania sejsmiczne w kopalni siarki Osiek prowadzone są od samego początku jej istnienia, tj. od roku 1993. Z uwagi na duże wartości osiadania górotworu, w początkowym okresie działania kopalni badania te ukierunkowane były na badanie deformacji nadkładu złoża w aspekcie ochrony otworów eksploatacyjnych i profilaktyki antyerupcyjnej (Dec i in. 1997). Poza problemami związanymi z deformacją nadkładu w procesie eksploatacji rodzą się też problemy dotyczące samej technologii prowadzenia wytopu złoża. Dlatego niezależnie od wspomnianego wcześniej aspektu badań interpretacja danych sejsmicznych ukierunkowana była także na wychwycenie zmian właściwości złoża zachodzących pod wpływem eksploatacji, a tym samym określanie poziomego zasięgu oddziaływania procesu wytopu złoża (Dec 2008). W przypadku występowania stref podwyższonej porowatości złoża a nawet form w postaci kawern podawana do otworów gorąca woda technologiczna, mająca podgrzać złoże do temperatury topnienia siarki, rozpływa się często w systemie „wolnych przestrzeni". Zastosowanie badań sejsmicznych okazuje się i w tym przypadku efektywne i pozwala na określenie dróg przepływu (Dec 2010).

Wieloletnie badania prowadzone na obszarze kopalni Osiek pozwoliły też na określenie zależności ilościowych pomiędzy amplitudą rejestrowanego od stropu złoża sygnału sejsmicznego a parametrami złoża siarki. Zależności te umożliwiają między innymi podjęcie

próby oszacowania zasobności jednostkowej złoża [Mg/m^2]. Rozpoznanie zasobów złoża na podstawie powierzchniowych badań sejsmicznych daje wartości szacunkowe wzdłuż wykonanego profilu badawczego. Wyznaczenie przestrzennej zmienności zasobności wymaga wykonania sejsmicznych badań 3D lub bardzo gęstej siatki sejsmicznych profili 2D.

1. Akwizycja i przetwarzanie danych

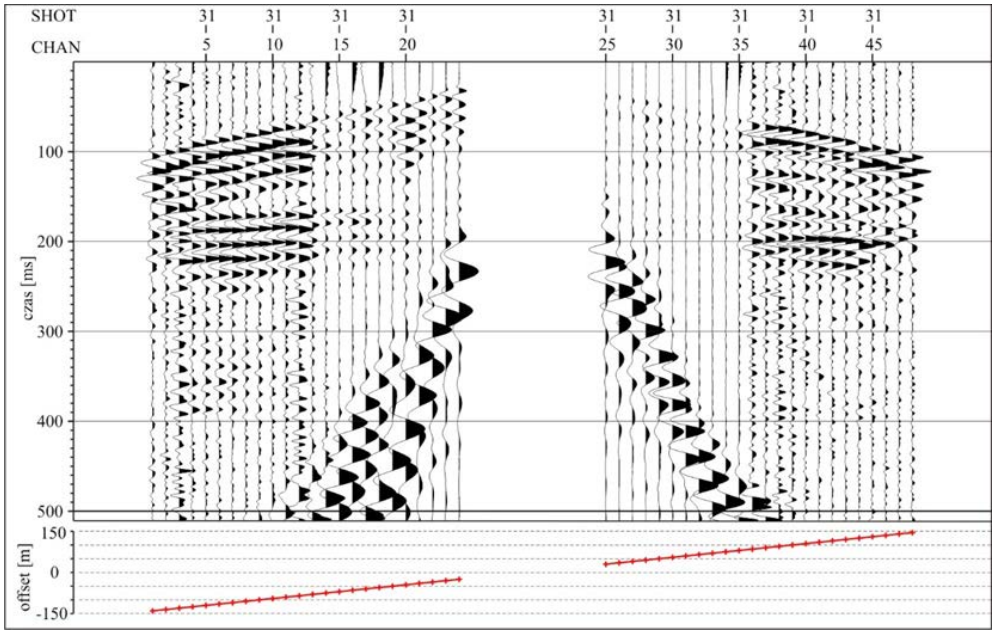
W badaniach sejsmicznych ukierunkowanych na rozpoznanie warstwy złoża pod kątem określania jego porowatości i zasobności stosowana jest metodyka wielokrotnego profilowania refleksyjnego, specjalnie opracowana dla warunków występowania złoża w Osieku. Badania wykonywane są wzdłuż profili 2D, a parametry metodyczne wyglądają następująco:

- rozstaw środkowy z oknem,
- liczba kanałów rejestrujących – 48,
- odległość pomiędzy kanałami – 5 m,
- odbiór – 1 geofon na kanał,
- interwał strzałowy – 5 m,
- wzbudzanie udarowe,
- składanie pionowe od trzy- do dziesięciokrotnego,
- zakres offsetów od –160 m do +160 m,
- nominalna krotność K = 24,
- czas rejestracji – 512 ms,
- krok próbkowania zapisu – 1 ms.

W wyniku zastosowania tak dobranych parametrów rejestracji uzyskuje się rekordy pomiarowe o wysokim stosunku sygnał/zakłócenie (S/N). Zastosowanie zaś okna przestrzennego powoduje, że koherentne zakłócenia w postaci fali powierzchniowej i akustycznej układają się na czasach większych niż czas wstąpienia refleksu od stropu złoża (rys. 1). W efekcie tego zabiegu, wykorzystywana do późniejszych obliczeń, amplituda refleksu od stropu złoża nie jest zaburzona poprzez zakłócenia koherentne. Nie jest więc ona zniekształcona w trakcie badań i tym samym w procesie przetwarzania zakłócenia koherentne nie będą musiały być usuwane. Stosowanie filtrów do usuwania takich zakłóceń zwykle prowadzi do przekłamań rzeczywistej amplitudy sygnału.

Zarejestrowane dane pomiarowe poddawane są następnie przetwarzaniu w systemie sejsmicznym umożliwiającym zwiększenie rozdzielczości zapisu i dalszą, znaczną redukcję zakłóceń. Cały cykl przetwarzania danych realizowany jest przy zastosowaniu następujących procedur:

- korekta przebiegów (tras) – eliminacja błędów, kontrola polaryzacji,
- przyjęcie zmiennego poziomu odniesienia *floating datum* (powierzchnia terenu),
- wprowadzenie polowych poprawek statycznych (redukcja pomiarów do *floating datum*),
- *muting*,
- powierzchniowo zgodne normowanie tras,
- filtracja formująca rekordów pomiarowych,



Rys. 1. Polowy rekord sejsmiczny

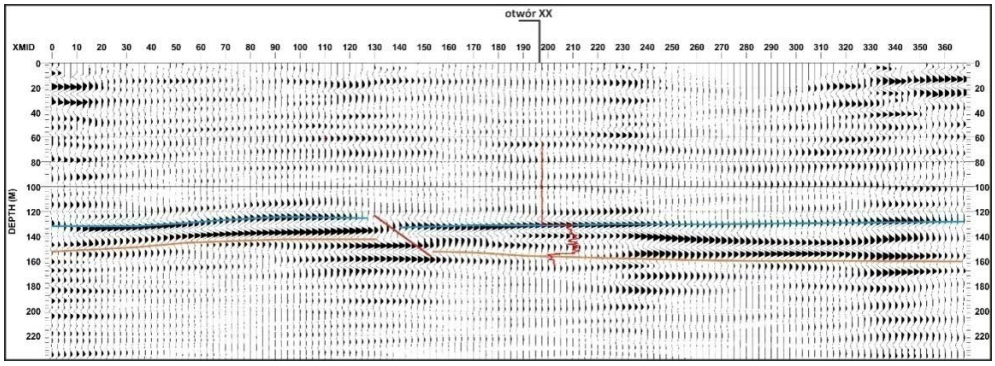
Fig. 1. Seismic field record

- powierzchniowo zgodna dekonwolucja typu *spike*,
- filtracja częstotliwościowa rekordów pomiarowych (20/40-150/180Hz),
- analiza prędkości na rekordach CMP,
- wprowadzenie poprawek kinematycznych NMO,
- automatyczna korekta statyki na rekordach CMP po NMO,
- sumowanie tras WPG,
- filtracja częstotliwościowa sumy (20/40-150/180Hz),
- filtracja FX sumy w celu eliminacji zakłóceń niekoherentnych,
- konwersja głębokościowa.

W kopalni siarki Osiek poziomem odniesienia jest powierzchnia terenu. Wszystkie dane otworowe podawane są względem tej powierzchni. Z tego względu oraz z uwagi na niewielkie deniwelacje terenu w obrębie profili sejsmicznych, dane sejsmiczne redukowane są do zmiennego poziomu odniesienia (*floating datum*), jakim jest „wygładzona" powierzchnia terenu.

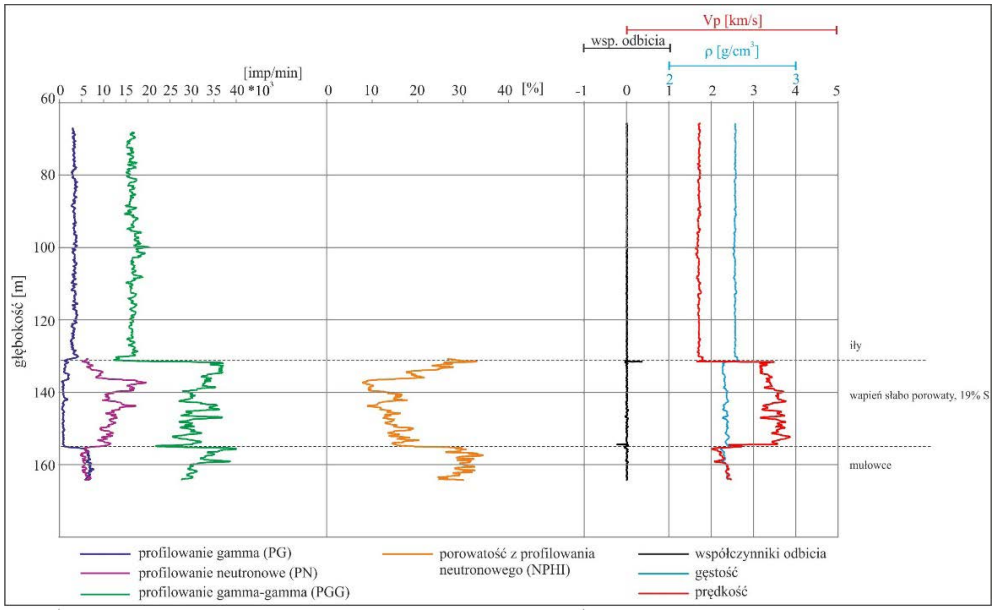
Uzyskiwane w wyniku konwersji głębokościowe przekroje sejsmiczne są korelowane są z danymi otworowymi. Na podstawie danych geofizyki otworowej wykonuje się dowiązanie danych sejsmicznych do przekroju litologicznego stwierdzonego w otworze. Po dowiązaniu danych sejsmicznych określana jest granica stropu i spągu złoża. Bazując na krzywych prędkości fali *P* oraz gęstości obliczane są też rozkłady współczynników odbicia (refleksyjności), a wartość współczynnika na stropie złoża służy do standaryzacji amplitud sygnału odbitego od tej powierzchni.

Przekrój głębokościowy wzdłuż doświadczalnego profilu poprowadzonego koło otworu XX przedstawia rysunek 2, zaś dane geofizyki otworowej dla otworu XX prezentowane są na rysunku 3 w postaci krzywych profilowań.



Rys. 2. Przekrój głębokościowy wzdłuż doświadczalnego profilu przechodzącego koło otworu XX. Linie: niebieska – strop, brązowa – spąg złoża, czerwona – krzywa prędkości

Fig. 2. Seismic depth profile along the experimental profile in the area of XX wellbore lines: blue – top, brown – bottom of the deposit, red – velocity log

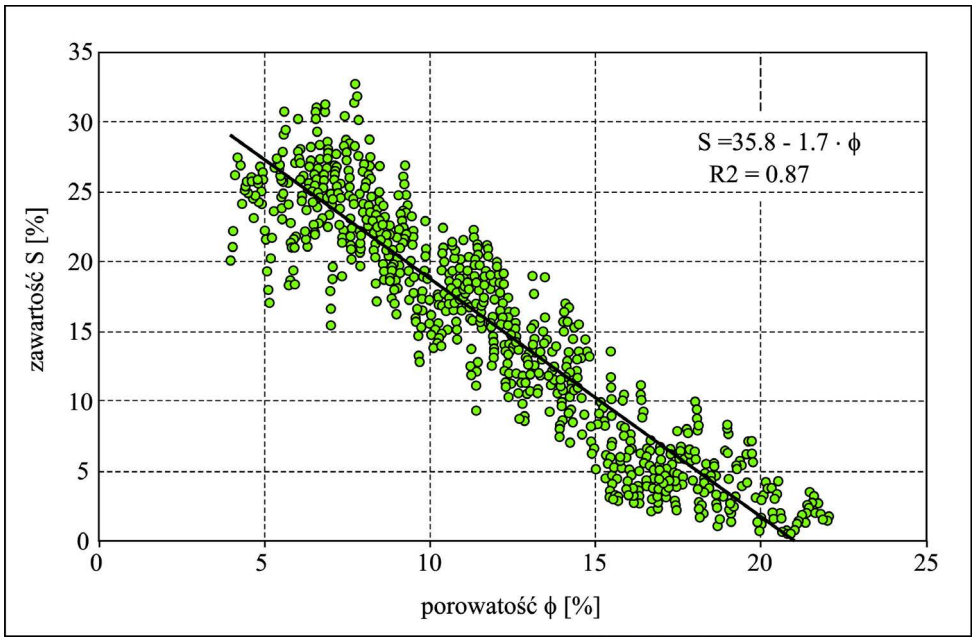


Rys. 3. Zestawienie krzywych geofizyki otworowej dla otworu XX

Fig. 3. Juxtaposition of well logs in XX wellbore

2. Wyznaczanie porowatości i zawartości siarki

We wcześniejszych badaniach opartych na analizie danych otworowych ustalona została zależność empiryczna pomiędzy średnią porowatością złoża a średnią zawartością siarki (Dec 2012). Rysunek 4 przedstawia zestawienie reprezentatywnych wartości średnich porowatości złoża i odpowiadających im wartości średnich koncentracji siarki, określonych w kilkudziesięciu otworach, w pełnym interwale złożowym tj. z pominięciem interwałów gipsowych. Analiza aktualnych danych otworowych potwierdza, że widoczny na rysunku 4 trend jest charakterystyczny dla całego rejonu kopalni Osiek.



Rys. 4. Empiryczna zależność zawartości siarki od porowatości (Dec 2012)

Fig. 4. Empirical relationship between sulphur and porosity

Matematycznie, relację pomiędzy porowatością φ a procentową zawartością siarki S określa liniowy estymator w postaci:

$$S = 35,8 - 1,7 \cdot \varphi \tag{1}$$

Przeprowadzone w ostatnim czasie przez autorów badania wskazują, że badania sejsmiczne pozwalają na określenie zależności ilościowych pomiędzy amplitudą rejestrowanego od stropu złoża sygnału sejsmicznego a parametrami złoża siarki.

Podstawowa zależność wiąże amplitudę sygnału odbitego od stropu złoża ze średnią porowatością złoża. Amplituda sygnału określana jest jako tzw. amplituda RMS (średniokwadratowa). Wyznaczana jest ona w wąskim oknie, którego środek pokrywa się z pozycją

granicy stropu. Obliczone tak amplitudy sygnału, dla punktów profilu leżących przy otworach, kalibrowane są do wartości współczynnika odbicia od stropu złoża obliczonego na podstawie danych otworowych.

Skalowanie amplitud sygnału $A(x)$ zarejestrowanych w danym punkcie x profilu sejsmicznego do wartości współczynnika odbicia $r(x)$ odbywa się poprzez przemnożenie unormowanych amplitud przez współczynnik kalibrujący. Wartość współczynnika kalibracji α określa się dla unormowanej amplitudy sygnału zarejestrowanego przy otworze wg poniższego wzoru:

$$\alpha = \frac{r_{otw}}{A(x_{otw}) / A_{\max}} \tag{2}$$

gdzie:

$A(x_{otw})$ – amplituda sygnału od stropu złoża zarejestrowana przy otworze,
$A_{\max}$ – maksymalna amplituda zarejestrowana od stropu,
r_{otw} – wartość współczynnika odbicia od stropu złoża stwierdzony w otworze.

W kolejnym kroku, w każdym punkcie pomiarowym x wartości liczbowe amplitudy sygnału zarejestrowanego od stropu złoża $A(x)$ są normowane i skalowane do wartości współczynnika odbicia (refleksyjności) $r(x)$:

$$r(x) = \frac{A(x)}{A_{\max}} \cdot \alpha \tag{3}$$

Na podstawie powyższych zależności wykonuje się skalowanie amplitud sygnału wzdłuż wszystkich profili tak, by w punktach wzajemnego przecięcia się profili wartości amplitud były równe. W ten sposób profil krzyżujący się, a nie przebiegający obok żadnego otworu, może zostać również wyskalowany do wartości refleksyjności.

Wartości refleksyjności wyznaczone w otoczeniu otworów zestawione z wartościami średniej porowatości stwierdzonej w danym otworze wykazują znakomitą korelację wzajemną. Przykładowe zestawienie tych wartości zawiera tabela 1, a relację pomiędzy wartościami refleksyjności i średniej porowatości przedstawia rysunek 5.

Widoczna na rysunku 5 relacja pomiędzy porowatością i refleksyjnością może być estymowana zależnością liniową:

$$\varphi(x) = 16,294 - 18,416 \cdot r(x) \tag{4}$$

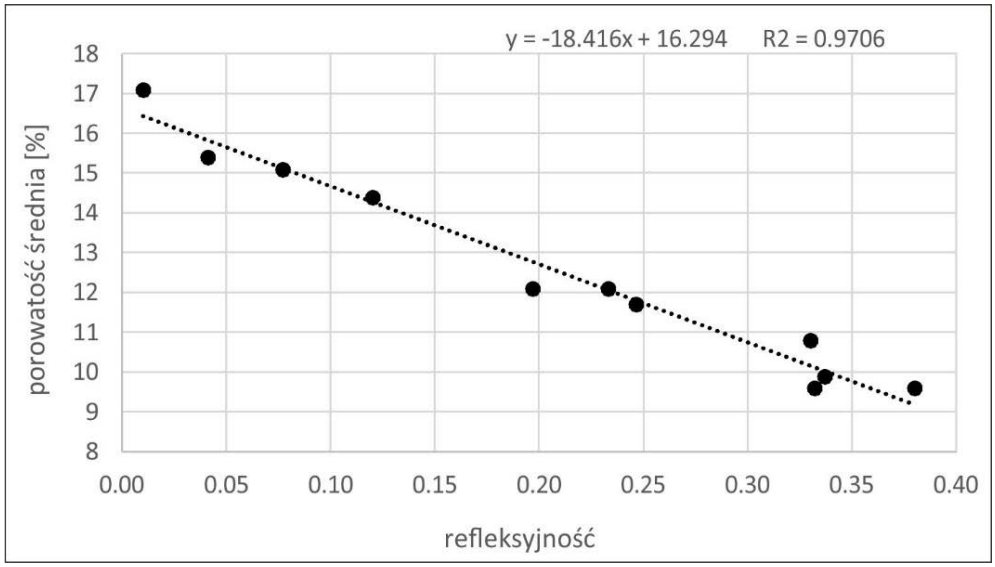
Po wcześniejszym obliczeniu refleksyjności stropu warstwy złożowej $r(x)$, na podstawie estymatora (4) można określić przybliżoną wartość porowatości złoża φ (rys. 6).

Następnie porowatość złoża jest przeliczana na zawartość siarki S. Do przeliczenia wykorzystywana jest podana wcześniej zależność (1). Zawartość procentowa siarki (rys. 7) cechuje się większym zakresem zmienności niż porowatość. Oznacza to, że zmiany porowatości silnie wpływają na koncentrację siarki.

TABELA 1. Korelacja porowatości i refleksyjności

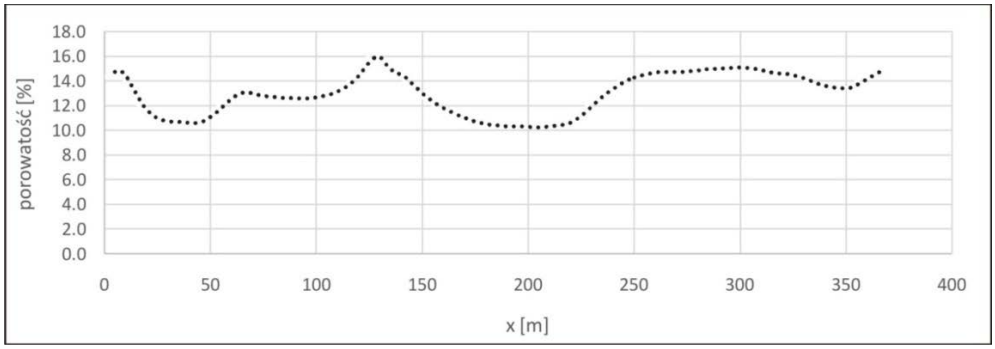
TABLE 1. Porosity and reflectivity correlation

φ [%]	r
10,8	0,330
11,7	0,247
15,4	0,041
15,1	0,077
14,4	0,120
9,6	0,332
9,6	0,380
12,1	0,233
12,1	0,197
9,9	0,337
17,1	0,011



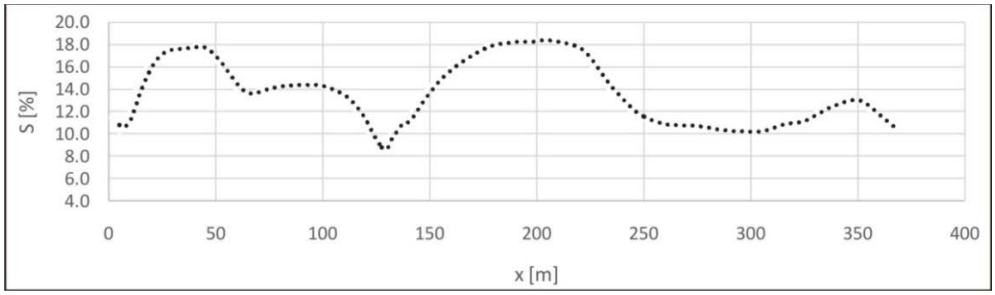
Rys. 5. Zależność porowatości od refleksyjności złoża

Fig. 5. Relationship between the deposit's porosity and reflectivity



Rys. 6. Rozkład porowatości wzdłuż profilu doświadczalnego (rys. 2)

Fig. 6. Porosity distribution along the experimental seismic profile (fig. 2)



Rys. 7. Rozkład zawartości siarki wzdłuż profilu doświadczalnego (rys. 2)

Fig. 7. Sulphur distribution along the experimental seismic profile (fig. 2)

3. Wyznaczanie zasobności jednostkowej

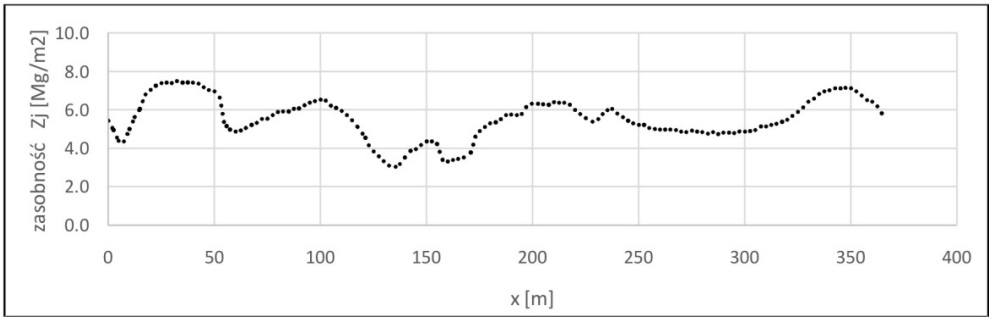
Pozycja granic stropu i spągu złoża określana jest po dowiązaniu zapisu sejsmicznego do danych otworowych. Na podstawie rzędnych głębokościowych tych granic obliczana jest miąższość złoża wzdłuż danego profilu. Dysponując w każdym punkcie profilu wartościami miąższości $h(x)$ i zawartości procentowej siarki $S(x)$, można szacować przybliżoną zasobność jednostkową złoża Z_j wyrażoną w [Mg/m^2]:

$$Z_j(x) = h(x) \cdot S(x) \cdot \rho \tag{5}$$

gdzie:

ρ – gęstość siarki [Mg/m^3].

Jak pokazuje wynik końcowy przedstawiony na rysunku 8, obliczona zasobność jednostkowa uzależniona jest w dużym stopniu od zmienności miąższości złoża. Dla rozpatrywanego profilu wartość średnia zasobności wynosi $Z_j = 5{,}5$ [Mg/m^2].



Rys. 8. Rozkład zasobności jednostkowej wzdłuż profilu doświadczalnego (rys. 2)

Fig. 8. Deposit's wealth distribution along the experimental seismic profile (fig. 2)

Podsumowanie

Należy podkreślić, że zgodnie z przepisami przedstawiona metoda szacowania zasobności jednostkowej nie może stanowić podstawy do dokładnego szacowania zasobów. Dopiero dane uzyskane z gęstej siatki otworów pozwalają na szacowanie zasobów przemysłowych, w tym przypadku w kategorii A.

Na pewno wyniki uzyskiwane z powierzchniowych badań sejsmicznych dają wstępne rozpoznanie złoża i pozwalają na planowanie usytuowania otworów. Dotychczasowe rezultaty badań, zweryfikowane wierceniami wskazują, że popełniany błąd bezwzględny jest niewielki, przeciętnie w granicach kilku procent dla całej długości profilu. Punktowe błędy osiągają poziom kilkunastu procent (są to jednak rzadkie przypadki).

Rozpoznanie zmienności właściwości złoża jest bardzo dokładne. Poziomy interwał pomiarowy wynosi 2,5 m. Pozwala to z dużym prawdopodobieństwem wskazać miejsca o zdecydowanie podwyższonej zawartości siarki, a w połączeniu z poprawnym wyznaczeniem miąższości złoża wskazać miejsca o perspektywicznych zasobnościach, przynajmniej w kategorii B.

Dla stref, które zdecydowanie nie powinny być obiektem zainteresowania (mała zasobność jednostkowa, zaburzenia ciągłości, przerosty gipsowe) dane sejsmiczne jednoznacznie wskazują na niekorzystne parametry złoża.

Przedstawione w artykule wyniki są rezultatem badań prowadzonych w Katedrze Geofizyki AGH w ramach prac statutowych nr 11.11.140.645.

Literatura

Dec i in. 1997 – Dec, J., Gorczyca, J. i Wojtycha, Z. 1997. Sejsmiczne prognozowanie powstawania stref deformacji nadkładu w otworowej eksploatacji siarki. *Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie* nr 10(38), s. 12–15.

Dec, J. 2008. Sejsmiczny monitoring otworowej eksploatacji złoża siarki. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* t. 24, z. 2/3, s. 199–213.

Dec, J. 2010. High resolution seismic investigations for the determination of water flow directions during sulphur deposits exploitation. *Acta Geophysica* Vol. 58, No. 1.

Dec, J. 2012. Wysokorozdzielcze badania sejsmiczne w celu rozpoznania złoża siarki Osiek oraz określania zmian dynamicznych zachodzących w wyniku eksploatacji. *Rozprawy Monografie* 257. Kraków: Wyd. AGH, ISBN 978-83-7464-528-7.

www.czasopisma.pan.pl PAN POLSKA AKADEMIA NAUK www.journals.pan.pl