

**WYKORZYSTANIE ATRYBUTÓW SEJSMICZNYCH
W INTERPRETACJI BADAŃ SEJSMICZNYCH
O PODWYŻSZONEJ ROZDZIELCZOŚCI
OTRZYMANÝCH NA ZŁOŻU SIARKI W OSIEKU**

**Using seismic attributes in interpretation of high-resolution seismic
sections from sulphur mine Osiek**

Joanna LĘDZKA & Ryszard ŚLUSARCZYK

*Akademia Górniczo-Hutnicza; Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska,
Zakład Geofizyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków;
e-mail: jledzka@geolog.geol.agh.edu.pl, slusar@geolog.geol.agh.edu.pl*

Treść: W pracy przedstawiono możliwość zastosowania atrybutów sejsmicznych w interpretacji badań sejsmicznych o podwyższonej rozdzielczości przeprowadzonych na terenie kopalni siarki w Osieku. Eksploatacja złóż siarki metodą otworową może powodować degradację powierzchni i poziomów wodonośnych. Zagrożenia te mogą być ograniczone poprzez prowadzenie bezpiecznej eksploatacji, w której proces wytapiania siarki jest pod stałą kontrolą. Przeprowadzane okresowo badania sejsmiczne pozwalają na określenie zmian zachodzących w ośrodku pod wpływem eksploatacji. Informacje te odgrywają dużą rolę zarówno w planowaniu eksploatacji, jak również w ochronie środowiska. Zastosowanie atrybutów daje możliwość lepszego odwzorowania złoża i jego nadkładu oraz zmian wynikających z eksploatacji.

Słowa kluczowe: badania sejsmiczne o podwyższonej rozdzielczości, atrybuty sejsmiczne, złożo siarki Osiek

Abstract: In this paper the evaluation of possibilities of seismic attributes in interpretation of high-resolution seismic section from sulphur mine in Osiek has been undertaken. Exploitation of sulphur deposits by melting with special well-system can destroys surface and water-bearing level. These threats could be reduced by safe exploitation, in which sulphur melting and processes connected with it are under permanent control. The application of periodic seismic profiling helps us define changes in formation resulting from the exploitation. This information is very important both in planning exploitation and in environment protection. Using seismic attributes gives us a better representation of deposits and overburden, and changes subsequent to exploitation too.

Key words: high resolution seismic, seismic attributes, sulphur mine Osiek

WPROWADZENIE

Eksploatacja złóż siarki rodzimej metodą otworową stwarza duże zagrożenie dla środowiska naturalnego. Wytapiana z wapienia siarka zostaje zastąpiona przez wody złożowe, a następnie osłabiony, porowaty wapień ulega zgniataniu przez warstwy nadkładu. W wyniku powstających pod wpływem eksploatacji deformacji ośrodka skalnego uszkodzeniu mogą ulegać otwory eksploatacyjne. Powstające w wyniku tego niekontrolowane przepływy wód technologicznych powodują skażenie gleby i poziomów wodonośnych. Rekultywacja powierzchni oraz ograniczanie przepływu skażonych wód jest czasochłonne i kosztowne. Zagrożenia te mogą być ograniczone poprzez prowadzenie bezpiecznej eksploatacji, w trakcie której wytop siarki i procesy z nim związane są pod stałą kontrolą.

Informacji o zmianach zachodzących w górotworze pod wpływem prowadzonej eksploatacji dostarczyć mogą badania sejsmiczne o podwyższonej rozdzielczości (Dec *et al.* 1996). Prace takie prowadzone były przez wiele lat na terenie otworowej kopalni siarki w Osieku. Wysokorozdzielcze badania sejsmiczne pozwalają na rozpoznanie budowy geologicznej złoża i jego nadkładu z dużą dokładnością. Ponadto okresowe wykonywanie badań stwarza możliwość określenia zmian zachodzących pod wpływem eksploatacji, co ułatwia sterowanie eksploatacją i ograniczenie powstawania zagrożeń.

CHARAKTERYSTYKA GEOLOGICZNA ZŁOŻA SIARKI W OSIEKU

Złoże Osiek-Baranów znajduje się 2 km na południe od Osieka. Rozciąga się równoleżnikowo na długości ok. 18 km. Szerokość złoża zmienia się od kilkuset do 2000 m. Dolina Wisły dzieli złożo na dwa obszary traktowane jako odrębne złoża: Osiek i Baranów-Skopanie (Pawłowski *et al.* 1987). Przekrój geologiczny przez złożo Osiek-Baranów przedstawiony został na figurze 1.

Powierzchnia stropowa i spągowa złoża jest nierówna, obniża się w kierunku południowo-wschodnim. Najpłycej strop złoża występuje w części zachodniej – na głębokości około 100 m, najgłębiej na wschodzie – około 264 m.

Złożo Osiek-Baranów ukształtowane zostało na obszarze masywu prekambryjskiego. Utwory prekambryjskie reprezentowane są przez grube kompleksy skał klastycznych lekko zmetamorfizowanych.

W spągu złoża znajdują się skały piaskowcowo-mułowcowe i węglanowe badenu dolnego. Są one zróżnicowane pod względem twardości: piaskowce sypkie i kruche oraz twarde. Miąższość tego kompleksu wynosi od 5–114 m (średnio około 25.5 m). Lokalnie w piaskowcach spoiwo wapniste może być zastępowane przez siarkę.

W nadkładzie złoża występują utwory czwartorzędowe, osady wapienno-ilaste i mułowcowo-piaszczyste sarmatu oraz badeńskie margle pektenowe. Utwory sarmatu i badenu stanowią kompleks nieprzepuszczalny dla wód.

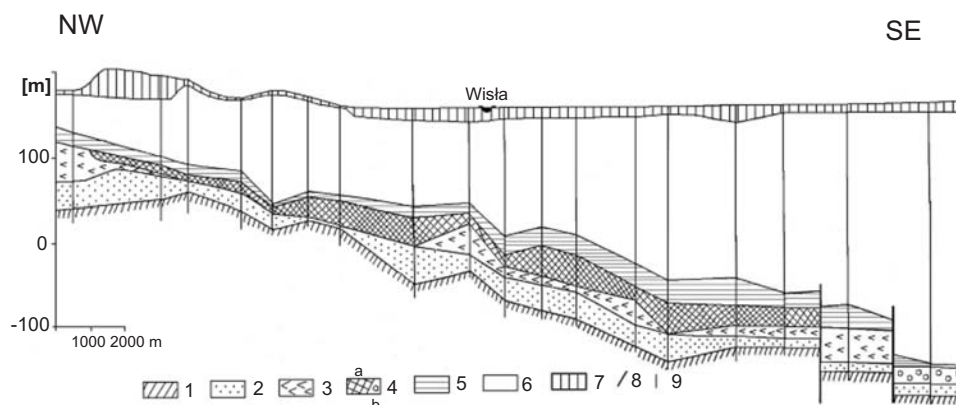


Fig. 1. Przekrój geologiczny przez złożę siarki Osiek-Baranów: 1 – prekambryj, 2 – piaski i piaskowce, 3 – gipsy, 4 – skały węglanowe, osiarkowane (a) i płonne (b), 5 – margle, 6 – osady ilaste, 7 – czwartorzęd, 8 – uskoki, 9 – otwory wiertnicze (wg Pawłowski *et al.* 1987)

Fig. 1. Geological cross-section through Osiek-Baranów sulphur deposit: 1 – precambrian, 2 – sand and sandstones, 3 – gypsum, 4 – carbonate, sulphur-bearing (a) and barren (b), 5 – marl, 6 – loamy sediments, 7 – quaternary, 8 – faults, 9 – holes (Pawłowski *et al.* 1987)

W skład serii złożowej wchodzi wapnienie stanowiące 80%. Ponadto w jej skład wchodzi margle, brekcje wapienne i ły. Wśród wapieni wyróżnić można różne odmiany: porowate, warstewkowe, wapnienie z pseudowarstwowymi nagromadzeniami siarki oraz osiarkowane wapnienie brekcjowe. Ponadto występują również odmiany kruche, rozsypliwie. Nagromadzenia i skupienia siarki rodzimej w wapieniach i marglach przybierają różne formy i kształty. Złożę charakteryzuje się dużą miąższością serii siarkonośnej. Miąższość złoża waha się od kilku do 45 m. Procentowa zawartość siarki w wapieniach pogipsowych wynosi 10–42%. W profilach obserwowano regularne i mało zmienne osiarkowanie oraz liczne odcinki wyjątkowo wzbogacone w siarkę. Od strony południowej złożę otacza strefa wapieni pogipsowych płonnych i częściowo gipsów. Od północy wokół złoża i w jego sągu występują gipsy. W najbliższym otoczeniu złoża gipsy są dobrze wykształcone i reprezentują prawie pełne profile (do 60 m).

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono występowanie w obrębie utworów badęńskich uskoki. Uskoki powodują zrzuty złoża o amplitudzie od kilkunastu do ponad 30 m (Pawłowski *et al.* 1987).

ODZWIERCIEDLENIE ZŁOŻA I JEGO NADKŁADU W ZAPISIE SEJSMICZNYM

Badania sejsmiczne na terenie kopalni siarki „Osiek” prowadzone były przez Zakład Geofizyki Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH w Krakowie od 1993 r. Realizowane były wzdłuż linii otworów eksploatacyjnych. Badania te wykonywane były zarówno przed eksploatacją, w celu rozpoznania pierwotnej budowy złoża i jego nadkładu, jak również w trakcie i po zakończeniu eksploatacji. Analiza zmian zapisu sejsmicznego

pozwała kontrolować zmiany zachodzące w ośrodku pod wpływem eksploatacji (Dec & Ślusarczyk 1994, Dec *et al.* 1997). Do realizacji badań sejsmicznych stosuje się opracowaną dla rejonu złoża siarki w Osieku metodykę badań sejsmicznych.

Podstawowe założenia metodyki badań są następujące:

- liczba kanałów rejestrujących – 24,
- odległość pomiędzy kanałami – 5 m,
- interwał strzałowy – 10 m,
- wzbudzanie udarowe,
- składanie pionowe od 3- do 10-krotnego,
- grupowanie odbiorników (dwa na kanał),
- wielokrotne profilowanie względem WPG.

Pomiary wykonano za pomocą aparatury ABEM Terraloc Mk-3.

Uzyskane dane pomiarowe poddane były przetwarzaniu w systemie VISTA (Seismic Image Software Ltd.). Przetwarzanie ma na celu przede wszystkim otrzymanie przekroju sejsmicznego.

Cykl przetwarzania realizowany był za pomocą następujących procedur:

- korekta i normowanie tras,
- filtracja rekordów pomiarowych,
- wprowadzenie poprawek statycznych i kinematycznych,
- automatyczna korekta statyki,
- sumowanie tras WPG,
- filtracja częstotliwościowa sumy.

W pracy wykorzystano pomiary wykonane na terenie kopalni siarki w Osieku wzdłuż linii otworów eksploatacyjnych 1900 w roku 1996 w celu określenia pierwotnej budowy złoża oraz wynik pomiaru wykonanego wzdłuż tej samej linii otworów z roku 1999. Pomiar ten miał na celu określenie wpływu eksploatacji na powstawanie zmian w złożu i jego nadkładzie.

Na figurze 2 przedstawione zostały fragmenty sekcji sejsmicznej uzyskanej wzdłuż linii otworów numer 1900 przed zakończeniem (Fig. 2A) i po zakończeniu eksploatacji (Fig. 2B).

Nadkład złoża siarki w Osieku stanowią głównie utwory ilaste z przewarstwieniami piasków ilastych, iłów piaszczystych i piasków. Seria złożowa natomiast zbudowana jest przede wszystkim z różnych odmian wapienia. Granice pomiędzy tymi warstwami są granicami sejsmicznymi. Ze względu na występowanie dużego kontrastu twardości akustycznej pomiędzy złożem a jego nadkładem najwyraźniej zaznaczającą się granicą jest strop złoża. W zdjęciu sejsmicznym wykonanym przed eksploatacją granice w nadkładzie stanowią najczęściej ciągle horyzonty.

Złoże, ze względu na odzwierciedlenie w zapisie sejsmicznym, można podzielić na dwie główne klasy.

- 1) Złoże zbite charakteryzujące się ciągłymi, niezaburzonymi refleksami. Na przedstawionej sekcji sejsmicznej wykonanej pod kątem rozpoznania budowy geologicznej ośrodka (Fig. 2A) złoże tego typu występuje od ok. 250–300 mb profilu.
- 2) Złoże spękanne, szczelinowate odzwierciedla się w zapisie sejsmicznym refleksami rozproszonymi o zmniejszonej amplitudzie. Tego typu złoże występuje do 250 mb i od ok. 300 mb do końca przedstawionego fragmentu sekcji sejsmicznej.

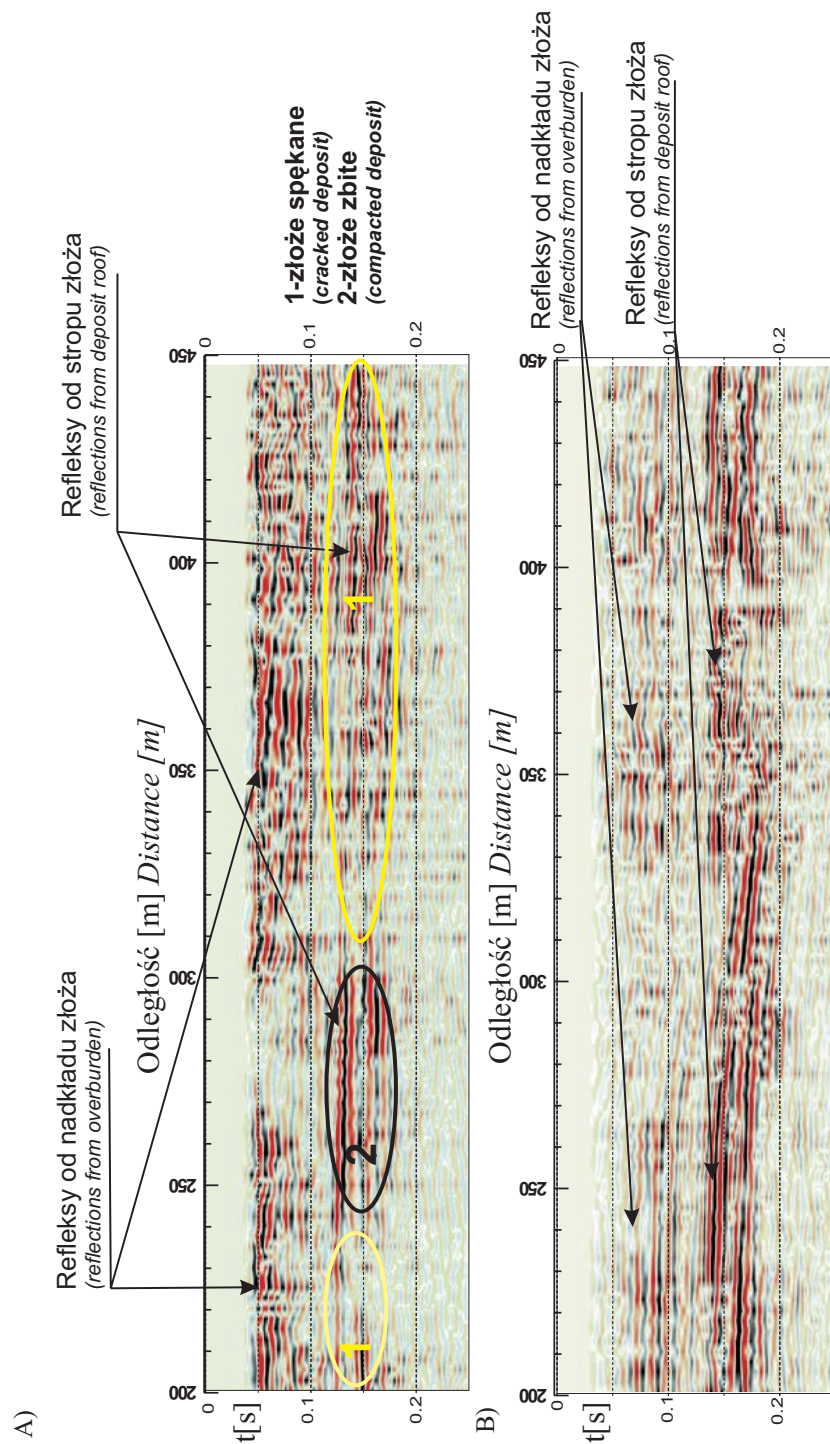


Fig. 2. Fragment sekcji sejsmicznej zarejestrowanej wzdłuż linii otworów 1900 przed eksploatacją (A) i po eksploatacji (B)

Fig. 2. Part of time seismic section recorded along holes line 1900 before (A) and after exploitation (B)

W trakcie eksploatacji złoża ulega przeobrażeniu, co powoduje również zmiany zapisu sejsmicznego od granicy stropu złoża. Na czasowym przekroju sejsmicznym zarejestrowanym po zakończeniu eksploatacji (Fig. 2B) obserwujemy przerwanie ciągłości refleksów od stropu złoża, oraz zmiany ich amplitudy. Ponadto obserwujemy również zmiany zapisu sejsmicznego w nadkładzie złoża. W wyniku osiadania i zmian parametrów sprężystych ośrodka następuje przerwanie ciągłości refleksów od granic w nadkładzie bądź dochodzi do ich zaniku.

ODZWIERCIEDLENIE ZŁOŻA I JEGO NADKŁADU W ATRYBUTACH SEJSMICZNYCH

Atrybuty sejsmiczne można definiować jako całość informacji uzyskanej z danych sejsmicznych bądź to w wyniku bezpośrednich obliczeń, bądź na podstawie doświadczeń i logicznego rozumowania (Taner 2001). Są one specyficzną miarą dynamicznych, kinematycznych i geometrycznych własności ośrodka wyprowadzonych z danych sejsmicznych. Pozwalają uzyskać ukryte w danych sejsmicznych informacje, które poszerzają możliwości wykorzystania badań geofizycznych w badaniu złóż: od poszukiwania, poprzez rozpoznanie do monitoringu. Atrybuty sejsmiczne mogą być wykorzystane zarówno w rozpoznawaniu złóż węglowodorów, jak również płytkich złóż, takich jak węgiel czy siarka, ze względu na kontrast twardości akustycznej pomiędzy złożem a otaczającym je ośrodkiem.

Atrybuty sejsmiczne można podzielić na (Taner *et al.* 1979):

- atrybuty geometryczne (*geometric attributes*),
- atrybuty fizyczne (*physical attributes*).

Atrybuty fizyczne są sejsmiczną miarą, która bezpośrednio odnosi się do propagacji fali w ośrodku, litologii i parametrów fizycznych ośrodka. Wyróżnia się wśród nich atrybuty chwilowe (*instantaneous attributes*) oraz atrybuty sygnału (*wavelet attributes*).

Podstawą do obliczenia atrybutów chwilowych jest zespolona trasa sejsmiczna. Składa się ona z:

- części rzeczywistej, którą stanowi sygnał zarejestrowany przez odbiornik;
- części urojonej, czyli transformaty Hilberta części rzeczywistej.

Wyróżnia się cztery główne atrybuty zespolonej trasy sejsmicznej:

- 1) amplitudę chwilową (*reflection strength, amplitude envelope*),
- 2) fazę chwilową (*instantaneous phase*),
- 3) częstotliwość chwilową (*instantaneous frequency*),
- 4) polaryzację pozorną (*apparent polarity*).

W analizie danych sejsmicznych z kopalni siarki „Osiek” wykorzystano amplitudę i fazę chwilową. Do obliczenia atrybutów wykorzystano system GeoGraphix firmy Landmark.

Amplitudę chwilową można wiązać z takimi własnościami fizycznymi ośrodka, jak: prędkość, twardość akustyczna, współczynnik odbicia itp. Definiowana jest jako obwiednia sygnału zarówno części rzeczywistej, jak i urojonej zespolonej trasy sejsmicznej. Może być wykorzystana do śledzenia granic sekwencji, głównych zmian w litologii. Duże jej wartości związane są zwykle z dużymi zmianami litologicznymi pomiędzy sąsiednimi warstwami, natomiast stopniowe zmiany tego atrybutu związane są często ze zmianami poziomymi ośrodka.

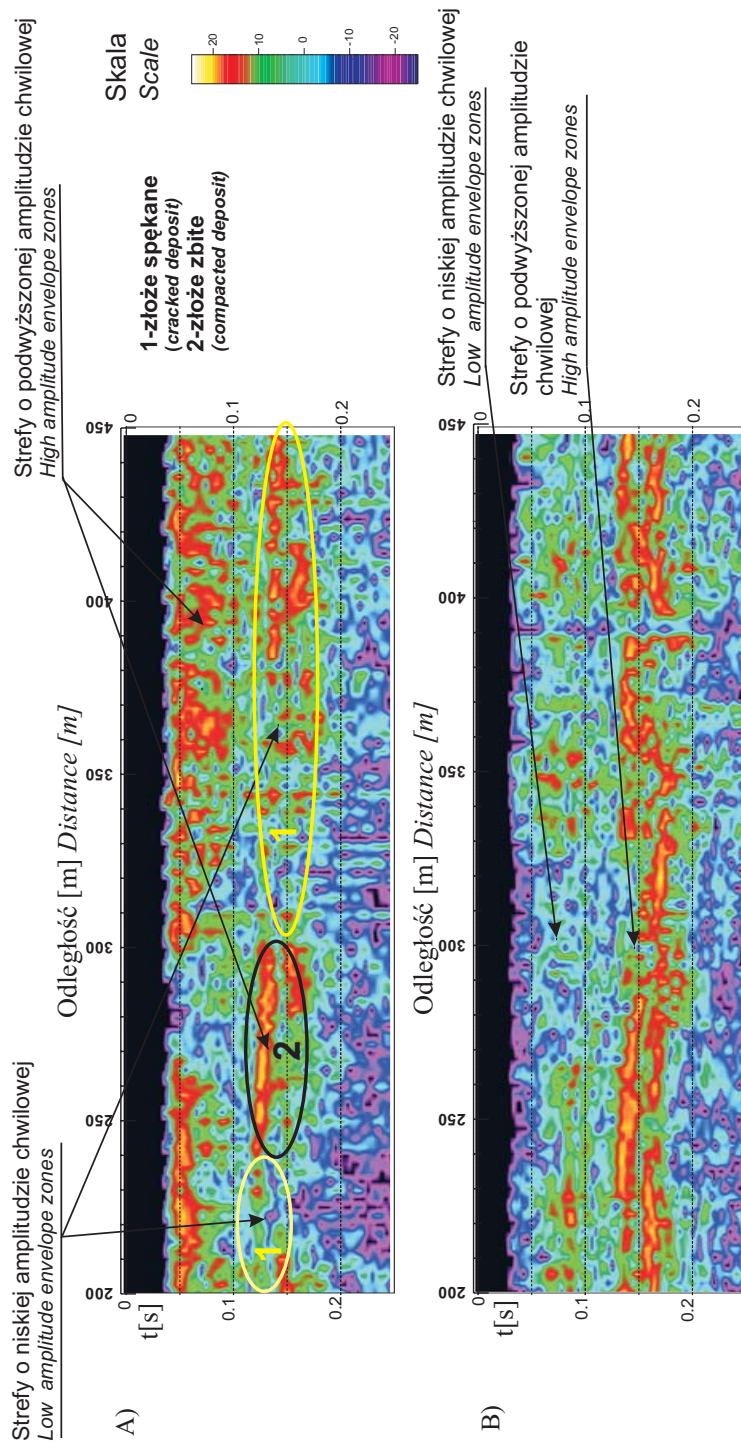


Fig. 3. Amplituda chwilowa obliczona dla fragmentu sekcji sejsmicznej zarejestrowanej wzdłuż linii otworów 1900 przed eksploatacją (A) i po eksploatacji (B)

Fig. 3. Amplitude envelope calculated for the part of time seismic section recorded along holes line 1900 before (A) and after exploitation (B)

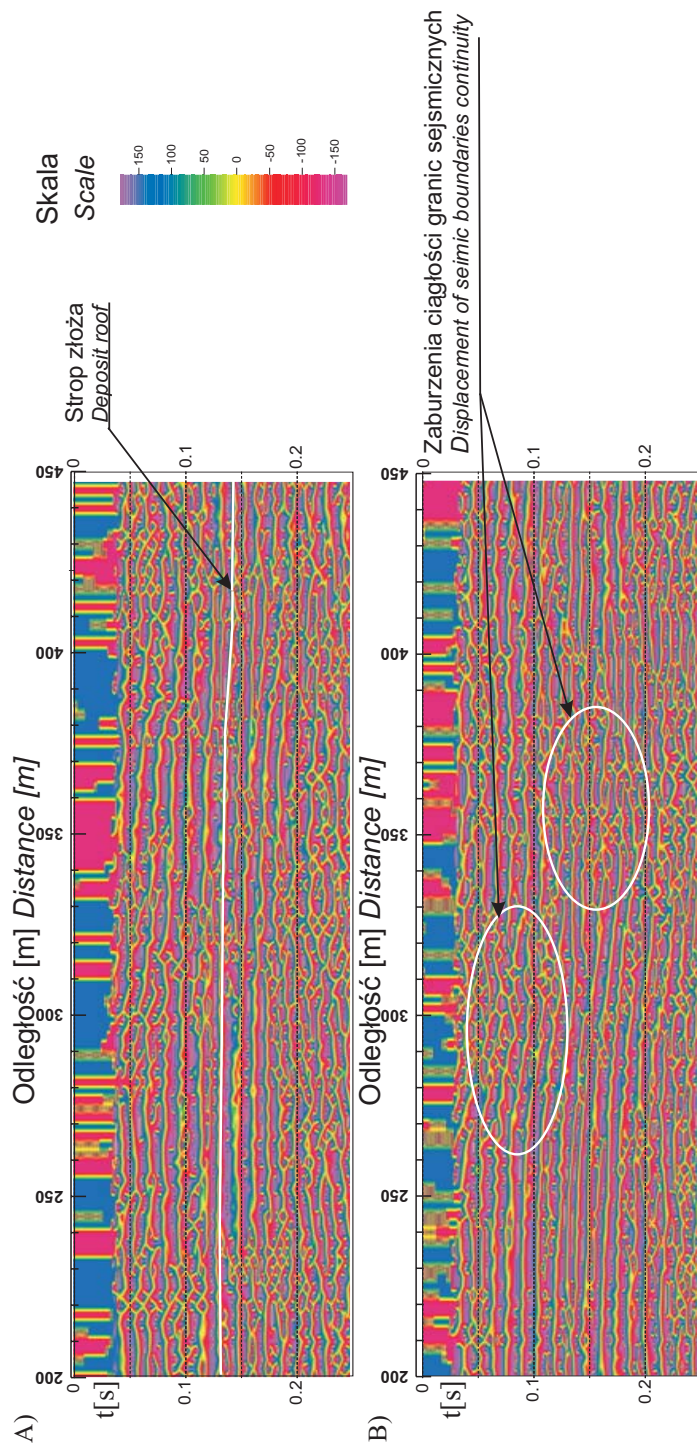


Fig. 4. Faza chwilowa obliczona dla fragmentu sekcji sejsmicznej zarejestrowanej wzdłuż linii otworów 1900 przed eksploatacją (A) i po eksploatacji (B)

Fig. 4. Instantaneous phase calculated for the part of time seismic section recorded along holes line 1900 before (A) and after exploitation (B)

Figura 3 przedstawia amplitudę chwilową (*amplitude envelope*) obliczoną dla części sekcji sejsmicznej zarejestrowanej wzdłuż linii otworów 1900 przed eksploatacją (Fig. 3A) i po eksploatacji (Fig. 3B). Na figurze 3A zaznaczono strefy występowania złoże zbitego i szczelinowatego wyznaczone na podstawie sekcji sejsmicznej (Fig. 2A). Złoże zbite charakteryzuje się wysokimi wartościami amplitudy chwilowej, natomiast w obrębie złoże spękanego obserwujemy spadek tego atrybutu. W obrębie warstw nadkładu przed eksploatacją można zauważyć wysokie wartości amplitudy.

Po eksploatacji (Fig. 3B) na całej rozciągłości złoże obserwuje się wysoką amplitudę. Można wiązać to ze zgnieciem wyeksploatowanej części złoże i zmianą jego parametrów sprężystych, takich jak np. prędkość, gęstość. W następstwie eksploatacji zmianie ulegają również parametry otaczających warstw. Może być to przyczyną spadku amplitudy chwilowej w nadkładzie.

Faza chwilowa również jest atrybutem fizycznym. Nie zawiera informacji o amplitudzie, dlatego wszystkie refleksy są widoczne. Może być wykorzystana jako wskaźnik ciągłości warstw oraz do korelacji granic sekwencji sejsmicznych. Ponadto jest szczególnie przydatna do identyfikacji uskoczków, wyklinowań czy niezgodności kątowych.

Figura 4 przedstawia fazę chwilową (*instantaneous phase*) obliczoną dla tej samej części sekcji sejsmicznej. Prezentacja tego atrybutu pozwala śledzić granice sekwencji przed eksploatacją i po eksploatacji. W przypadku fazy chwilowej obliczonej dla czasowego przekroju sejsmicznego zarejestrowanego przed eksploatacją (Fig. 4A) obserwuje się ciągłość granic nawet w przypadku słabych refleksów w strefie złoże spękanego. Faza chwilowa obliczona dla danych sejsmicznych zarejestrowanych po zakończeniu eksploatacji (Fig. 4B) daje możliwość rozpoznania nieciągłości wynikających ze zgniatania partii wyeksploatowanego złoże i osiadania nadkładu.

WNIOSKI

Badania sejsmiczne o podwyższonej rozdzielczości odgrywają dużą rolę w rozpoznaniu budowy geologicznej złóż siarki oraz rozwiązywaniu problemów związanych z ich eksploatacją. Atrybuty sejsmiczne pozwalają na lepsze odzwierciedlenie pierwotnej budowy ośrodka, jak również zmian zachodzących w złoże i jego nadkładzie pod wpływem eksploatacji.

W interpretacji danych zarejestrowanych przed eksploatacją pod kątem rozpoznania budowy geologicznej ośrodka wykorzystać można zarówno amplitudę, jak i fazę chwilową. Amplituda chwilowa pozwala na dokładniejsze wyznaczenie stref występowania złoże zbitego i spękanego, co jest istotne w planowaniu eksploatacji. Faza chwilowa natomiast daje możliwość wyznaczenia granic złoże, nawet w strefie występowania złoże spękanego, gdzie refleksy charakteryzują się niską amplitudą.

Ponadto analiza fazy chwilowej obliczonej dla danych zarejestrowanych po zakończeniu eksploatacji pomaga w wykrywaniu deformacji powstających w wyniku osiadania warstw nadkładu i zgniatania wyeksploatowanych partii złoże.

LITERATURA

- Dec J., Gorczyca J., Guła Z. & Ślusarczyk R., 1996. Planowanie i prowadzenie otworowej eksploatacji siarki w oparciu o badania sejsmiczne. *Geologia*, 22, 1, 61–68.
- Dec J., Gorczyca J. & Wojtycha Z., 1997. Sejsmiczne prognozowanie powstawania stref deformacji nadkładu w otworowej eksploatacji siarki. *Miesięcznik WUG*, 10.
- Dec J. & Ślusarczyk R., 1994. Badania sejsmiczne w górnictwie otworowym siarki w aspekcie ochrony środowiska. *Mat. Konf. „Ekologia w górnictwie a geofizyka”*, Ustroń.
- Dec J. & Ślusarczyk R., 1994. Zastosowanie badań sejsmicznych w problematyce górnictwa otworowego siarki. *Mat. Symp. „Siarka rodzima – geologia, górnictwo, ekonomika i ochrona środowiska”*, Kraków.
- Pawłowski S., Pawłowska K. & Kubica B., 1987. Siarka rodzima. W: Osika R. (red.), Budowa geologiczna Polski T. 6: Złoża surowców mineralnych, część IV: Surowce chemiczne, 378–412, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Taner M.T., Koehler F. & Sheriff R.E., 1979. Complex seismic trace analysis. *Geophysics*, 44, 6, 1041–1063.
- Taner M.T., 2001. Seismic attributes. *CSEG Recorder*, September Issue, 48–56.

Summary

Exploitation of sulphur deposits by melting with special well-system destroys natural environment. The threats could be reduced by safe exploitation, in which sulphur melting and processes connected with it are under permanent control. High-resolution seismic profiling is helpful in recognition of geologic structure of deposit and its overburden and gives us information about changes in deposits resulting from the exploitation. Such kind of work has been led for many years in Polish sulphur mine “Osiek”. Geologic profile of sulphur deposit in Osiek is presented on Figure 1.

Seismic measurements in the Osiek sulphur mine have been executed along the exploitation holes line. Figure 2 presents part of a time section recorded along holes line number 1900 before (Fig. 2A) and after exploitation (Fig. 2B). Because of high seismic impedance contrast between deposit and its overburden, the deposit roof is the strongest marked boundary in seismic time section. Generally, boundaries in the overburden are continuous horizons in seismic section recorded before exploitation. A deposit can be divided into two classes in terms of representation in seismic section. Continuous, undisturbed reflections are characteristic of compacted deposit. On the other hand, disperse reflections with lower amplitude can be connected with cracked deposit.

During the exploitation a deposit changes what causes also changes in reflections recorded from the deposit roof. Breaks in the continuity of reflections from the deposits roof and amplitude changes are observed in seismic time section recorded after the finished exploitation. Moreover, we observe also changes in reflection from boundaries in overlaying layers as a result of subsidence and changes of elastic parameters of formation.

To analyze seismic data from sulphur mine “Osiek” we used complex attribute: amplitude envelope and instantaneous phase. Figure 3 presents envelope amplitude calculated for

the part of time seismic sections recorded along holes line 1900 before (Fig. 3A) and after exploitation (Fig. 3B). Before exploitation we observe an increase of amplitude both in overburden and in part of compacted deposit. After exploitation we observe high amplitude in all parts of deposit, what can be connected with the compaction of exploited deposit and elastic parameters like velocity changes. Parameters of surrounding rocks also change as a result of the exploitation. This can lead to a decrease of the observed amplitude in the overburden.

Figure 4 presents instantaneous phase calculated for the same part of the seismic time section. Presentation of this attribute allows the continuity of boundaries before and after exploitation to be followed. It is important in recognition of unconformities resulted from the overburden subsidence.