

Nowoczesne metody interpretacji strukturalno-facjalnej danych sejsmiki 3D na przykładzie złoża Stężycza

Barbara Kuc*

Modern tectonic and facies interpretation techniques of 3D seismic data — Stężycza example (eastern Poland)

S u m m a r y. Interpretation of seismic attribute maps introduced in 1989 is a relatively new tool for a geological analysis of seismic data. Relative number of application of seismic attribute maps has since then significantly raised. This growth is driven by favourable and confirmed advantages of this technology which enabled to reveal significantly greater detail of studied rocks than can be accurately imaged by an interpreter using the vertical seismic sections alone.

This paper illustrates some aspects of the applications of seismic attribute maps in structural and facies interpretation and shows how these maps may help in the characterization of fault zones and provide basis for establishing the structural evolution of Stężycza field (eastern Poland).

Wielką zaletą tych map jest:

- ❖ możliwość obserwacji większej liczby szczegółów budowy strukturalnej analizowanego obszaru w stosunku do możliwości, jakie daje interpretacja granic refleksyjnych na pionowych profilach sejsmicznych,

- ❖ możliwość przedstawienia poziomej i pionowej kontynuacji płaszczyzn uskoków nie tylko w odniesieniu do głównych stref dyslokacyjnych, ale również do uskoków o mniejszym zrzućcie (kilka do kilkunastu metrów) i stref spękań, które im towarzyszą,

- ❖ możliwość pokazania szczegółów budowy wewnętrznej badanego obszaru — indywidualnych spękań czy zmian facjalnych.

Złoże Stężycza jest zlokalizowane na obszarze synklinorium lubelskiego (ryc. 1). Pierwsze prace sejsmiczne metodą refleksyjną w tym rejonie zostały wykonane w 1956 r. Jednakże, przy rozpoznaniu struktury złoża istotną rolę odegrały prace prowadzone metodą wibratorową w okresie

Zasadniczym celem interpretacji strukturalnej jest dążenie do prawidłowego odzwierciedlenia budowy tektonicznej analizowanego obszaru. Właściwe odwzorowanie przebiegu płaszczyzn uskoków głównych oraz możliwość określenia zasięgu występowania towarzyszących im stref mniejszych zaburzeń tektonicznych ma fundamentalne znaczenie w rozwiązywaniu zagadnień związanych z poszukiwaniem pułapek złożowych oraz określeniem zasięgu występowania złoża. Bardzo istotne jest również zdefiniowanie oraz określenie zmienności facji.

Jedną z najnowszych metod stosowaną do rozwiązywania tego typu zagadnień jest metoda tworzenia i analizy map atrybutów fali sejsmicznej (Jones & Knipe, 1996). Możliwość takie daje program SeisWorks/3D firmy Landmark Graphics Corporation.

Procentowy udział interpretacji, opartej na wykorzystaniu tych map, stale wzrasta i znajduje zastosowanie zarówno w interpretacji regionalnej, jak też w szczegółowej analizie budowy badanych obszarów złożowych.

*Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo, Biuro Geologiczne GEONAF TA, ul. Jagiellońska 76, 03-301 Warszawa



Ryc. 1. Lokalizacja złoża Stężycza
Fig. 1. Location of the Stężycza field

od 1979 do 1994 r. Interpretacja danych sejsmicznych otrzymanych w wyniku tych prac pozwoliła na udokumentowanie elementu strukturalnego typu brachyantykliny w utworach dewonu i lokalizację otworu Stężycza-1, w którym nawiercono 9 karbońskich horyzontów piaskowcowych o dobrych cechach zbiornikowych, z objawami węglowodorów. Najbardziej perspektywiczny okazał się karboński kompleks I, w którym stwierdzono przemysłową akumulację

gazu ziemnego. Serię uszczelniającą stanowiły utwory ilasto-mułowcowe. Poziom złożowy jest zbudowany z różnoziarnistych piaskowców z laminami mułowców, iłowców i łupków. Całkowita jego miąższość wynosi 75 m (Kaczyński, 1994).

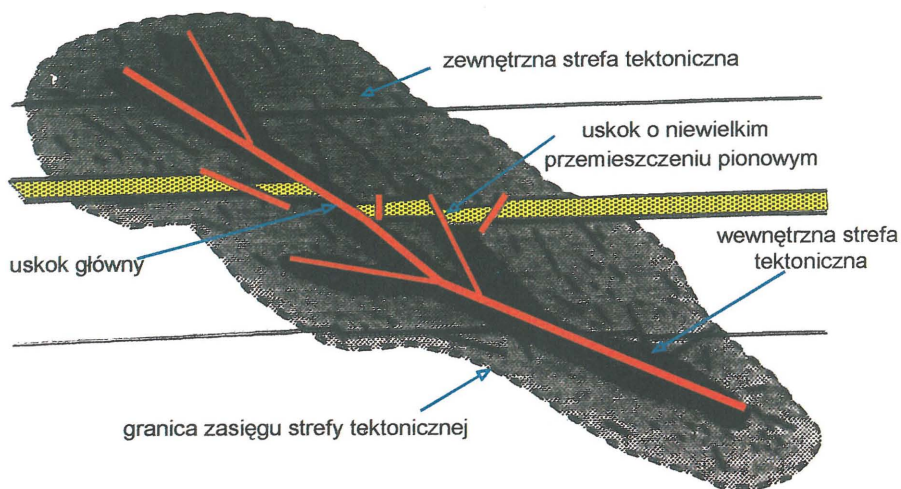
Dane otrzymane w wyniku prowadzonych tu badań geologicznych, geofizycznych i złożowych pozwoliły na określenie typu pułapki, jak również parametrów złoża.

Wskazywały jednakże na dużo bardziej skomplikowaną budowę strukturalną i facjalną.

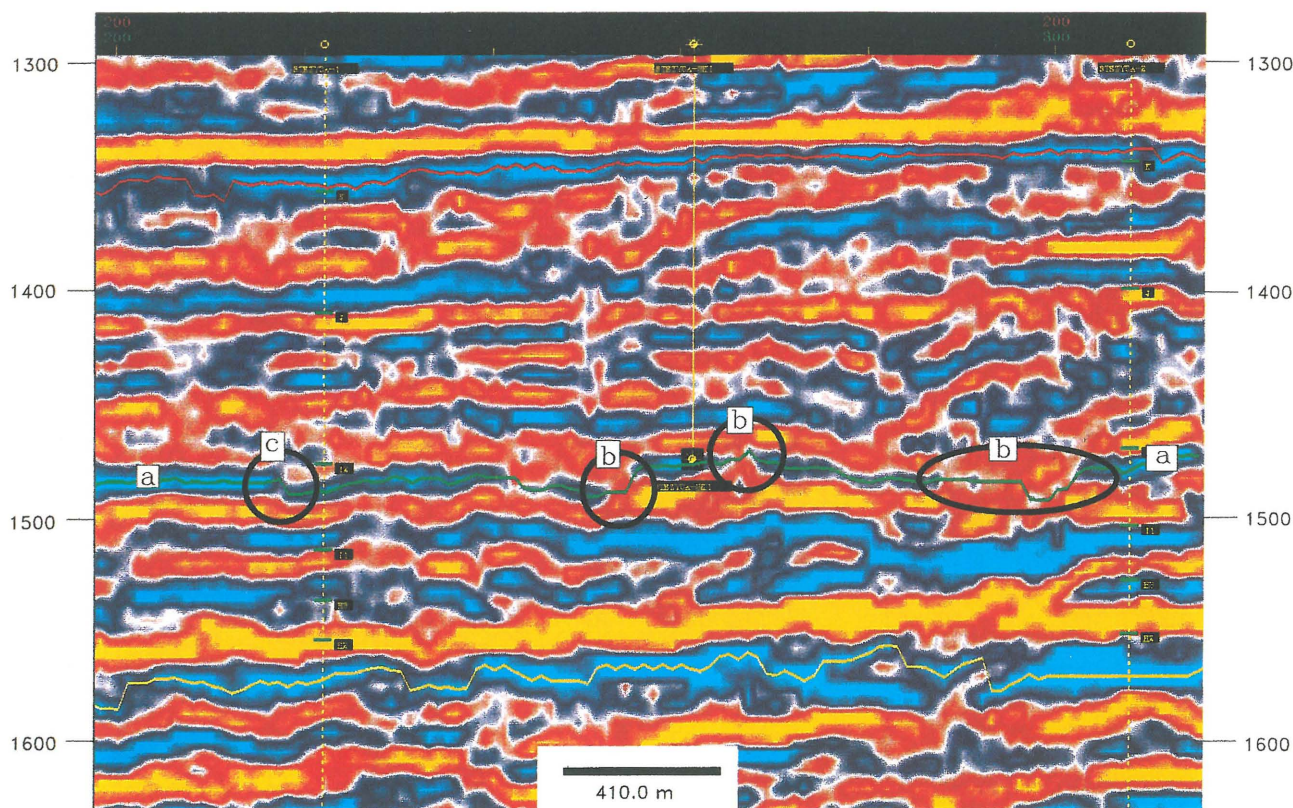
Fakty te stały się jednym z głównych powodów, które zdecydowały o konieczności rozpoznania złoża metodą sejsmiki trójwymiarowej. Zadaniem tego rozpoznania było zbadanie przestrzennej budowy strukturalnej pułapki złożowej Stężycza, ze szczególnym zwróceniem uwagi na zagadnienia tektoniki i wydzielenie obszarów występowania facji o dobrych właściwościach zbiornikowych.

Interpretacja tektoniczna

W zależności od rodzaju skał budujących zbiornik gazu bądź ropy i gazu, ich odporność



Ryc. 2. Diagram obrazujący typy uskoków i towarzyszącą im strefę zaburzeń tektonicznych
Fig. 2. Schematic diagram showing kinds of faults and damage zone



Ryc. 3. Interpretacja granicy sejsmicznej metodą autokorelacji za pomocą opcji *AutoTrack*: a — granica sejsmiczna odzwierciedlająca strop karbońskiej serii zbiornikowej I; b — strefa braku interesującej nas granicy sejsmicznej, która może być związana ze zmianą facji; c — strefa raptownej zmiany przebiegu linii korelacyjnej, związanej prawdopodobnie z obecnością uskoku

Fig. 3. Interpretation of seismic horizon (automatic option *AutoTrack*); a — seismic horizon related to the top of the Carboniferous reservoir series I; b — zone without the seismic horizon I, probably related to the facies changes; c — zone of rapid change of seismic horizon probably related to a fault

na różne procesy geologiczne, obserwowane dyslokacje możemy podzielić na uskoki o znacznym i niewielkim przemieszczeniu pionowym (kilka do kilkunastu metrów) oraz towarzyszące im strefy spękań (ryc. 2). Interpretacja bazująca na analizie pionowych profili sejsmicznych pozwala na wyznaczenie płaszczyzn uskoków o stosunkowo dużym zrzucie. Interpretacja uskoków o niewielkim przesunięciu pionowym oraz określenie zasięgu występowania stref spękań są praktycznie niemożliwe. Prowadzi to często do znacznych błędów w oszacowaniu zasięgu występowania złoża oraz nasycenia zbiornika. Znajomość wielkości zrzutu, zasięgu występowania strefy przyuskokowej oraz stref zmian facjalnych mają zasadnicze znaczenie w ocenie zdolności uskoku do uszczelniania danej serii geologicznej, a zatem migracji węglowodorów.

Ważnym aspektem interpretacji jest uświadomienie sobie, iż jakość map atrybutów fali sejsmicznej jest efektem jakości zarejestrowanych danych sejsmicznych i korelacji horyzontu sejsmicznego. Tworzenie i interpretacja tych map jest możliwa, jeśli otrzymane dane spełniają przynajmniej dwa podstawowe warunki, tj.

- 1) otrzymany sygnał sejsmiczny jest zerofazowy,
- 2) amplitudy fali sejsmicznej są rzeczywiste.

Najlepszy efekt interpretacji jest możliwy do osiągnięcia przy użyciu opcji autokorelacji *AutoTrack*. Użycie opcji *AutoTrack* pozwala na prowadzenie linii korelacyjnej w sposób ciągły, nawet w tych obszarach, gdzie obserwuje się całkowity brak interesującej nas granicy sejsmicznej. Linia korelacyjna z trasy na trasę wskazuje miejsca maksymalnej wartości amplitudy fali sejsmicznej odbitej od powierzchni interesującej nas granicy (ryc. 3). Ten typ interpretacji jest konieczny do podkreślenia wielu szczegółów budowy strukturalnej i pozwala na użycie technik kolorów i cieni, które uwytklają topografię analizowanego elementu (Brown, 1988).

Zagadnienia związane z tektoniką najlepiej odzwierciedlają następujące mapy atrybutów fali sejsmicznej:

- mapa kątów upadu (kąt wyznaczony w danym punkcie granicy refleksyjnej przez jej styczną), obszary ich największych zmian korelują się z uskokami. Mapa ta powstaje w wyniku rejestracji kątów upadu granicy refleksyjnej wzdłuż każdej linii sejsmicznej,
- mapa krawędzi (pochodna kątów upadu). Miejsca nagłych zmian przebiegu linii korelacyjnej są identyfikowane jako uskoki. Powstaje ona z połączenia kątów upadu granicy refleksyjnej w poprzek każdej linii sejsmicznej i określa wielkość zrzutu,
- mapy ekstrakcji amplitudy fali sejsmicznej odbitej od stropu lub spągu analizowanej serii geologicznej lub jej wnętrza (mapy amplitudy wykonane w różnych bramkach czasowych). Przy zachowaniu rzeczywistych wartości amplitudy fali sejsmicznej i zastosowaniu metody autokorelacji zmiany wartości amplitudy fali sejsmicznej odzwierciedlają zmiany facji serii geologicznej lub uskoki.

Podstawę interpretacji stanowiły mapy atrybutów fali sejsmicznej, pozwalające przede wszystkim na dość szczegółową analizę budowy strukturalnej analizowanej pułapki.

Integracja danych sejsmicznych z sejsmogramem syntetycznym, wykonanym na podstawie krzywej akustycznej oraz krzywej gęstości pomierzonej w otworze Stężycy-1, pokazuje iż na obszarze złoża Stężycy interesujące nas granice są związane z dodatnią amplitudą sejsmiczną (Górski i in., 1996). Mapę krawędzi obserwowanych na powierzchni odzwierciedlającej strop utworów franu (Dfr) przedstawia

ryc. 4. Analiza otrzymanego obrazu pozwala na natychmiastową ocenę budowy strukturalnej tej powierzchni, pokazując zalety stosowanej metody. Widoczne w przedstawionym obrazie linie odzwierciedlają poziomą kontynuację uskoków obecnych na tej powierzchni. Kolorowa wersja danych daje możliwość określenia relacji między wielkością ich zrzutu (patrz skala barw).

Na mapie tej są widoczne dwa uskoki o kierunku NW-SE (ryc. 4 i 4a), które dzielą antyklinę Stężycy na trzy oddzielne strefy:

- 1) południowo-zachodnią — o stosunkowo dużym zaangażowaniu tektonicznym, gdzie można zaobserwować obecność uskoków o kierunku N-S i NE-SW;
- 2) centralną — o niewielkim stopniu zaburzenia, strefę otworów Stężycy-1, 2 i 3K;
- 3) północno-zachodnią — charakteryzującą się łagodną budową strukturalną w południowej części i stosunkowo dużym zaangażowaniem tektonicznym w części północnej.

Uskoki te charakteryzuje stosunkowo niewielki zrzut, zmienny wzdłuż linii przebiegu. Największy zrzut uskoku (kolor zielony — około kilku metrów) o kierunku NW-SE, który przebiega w południowej części struktury Stężycy, jest widoczny w strefie między liniami sejsmicznymi 210-280. W kierunku SE wielkość zrzutu maleje na korzyść strefy spękań (kolor czerwony), która najprawdopodobniej jest pochodną obu dyslokacji głównych.

Kolorowa linia przebiegająca w środkowej części struktury obrazuje drugą dyslokację główną (ryc. 4 i ryc. 4a). Największy zrzut tego uskoku jest widoczny w części NW i SE. W środkowym odcinku tej linii wielkość zrzutu maleje, aż do prawie całkowitego zaniku.

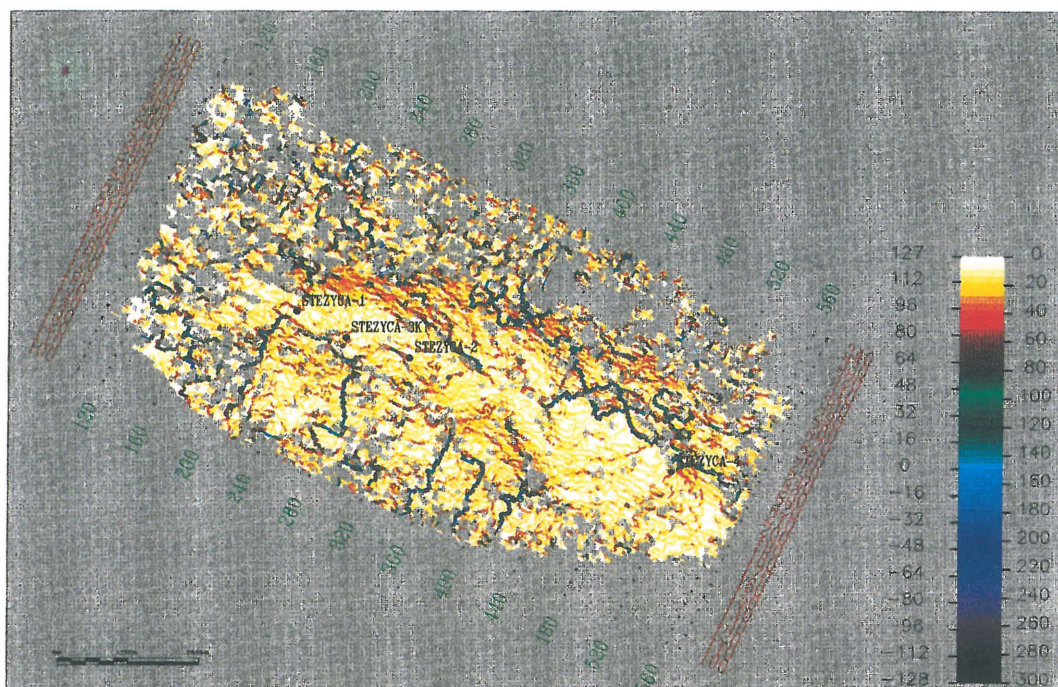
Obszar spękań (kolor czerwony) i uskoków w części N struktury jest związany z dyslokacją regionalną obcinającą element struktury Stężycy od strony północnej.

Mapa krawędzi, wykonana dla powierzchni odzwierciedlającej strop utworów famenu (Dfm — ryc. 5), pokazuje analogiczną budowę strukturalną, w stosunku do wyżej opisanej powierzchni odzwierciedlającej utwory franu (Dfr). W zarejestrowanym obrazie są widoczne dwa uskoki o kierunku NW-SE, dzielące element Stężycy na trzy strefy (ryc. 5 i ryc. 5a). Uskokom tym towarzyszą strefy spękań (kolor czerwony).

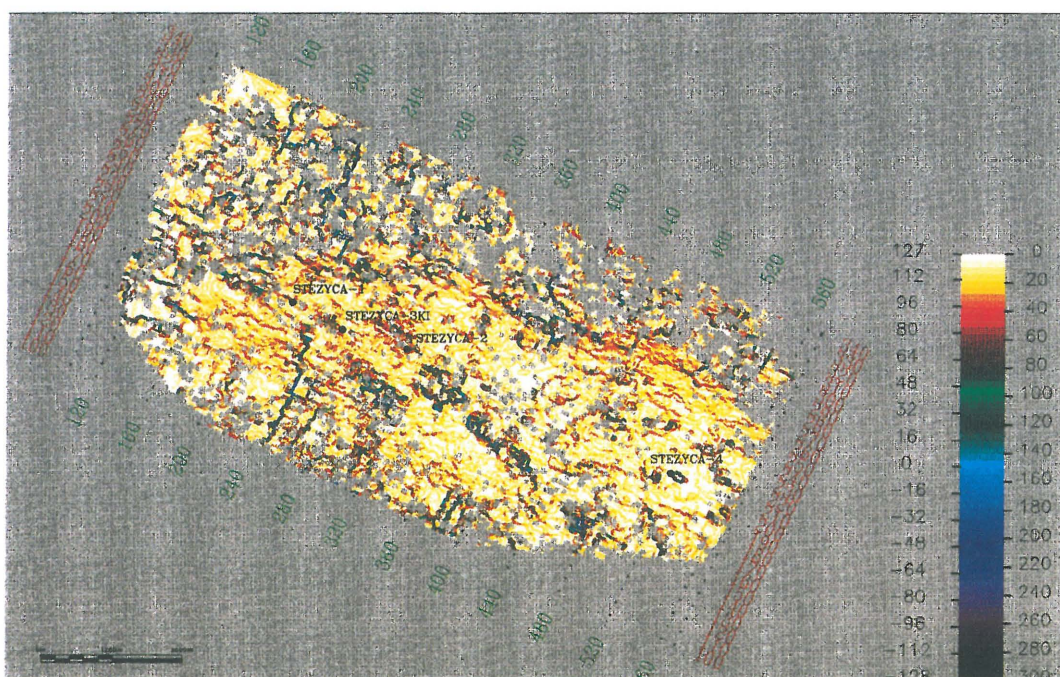
Kompleksowa interpretacja map krawędzi, pionowych profili sejsmicznych i cięć poziomych (*time slice*) pozwala na szybkie i jednoznaczne wyznaczenie przebiegu płaszczyzn tych uskoków w pionie.

Najbardziej interesująca z punktu poszukiwań węglowodorów w obrębie analizowanego złoża Stężycy jest granica sejsmiczna I, odzwierciedlająca strop karbońskiej serii złożowej. Mapę krawędzi wykonaną dla tej powierzchni prezentuje ryc. 6. Przedstawiony obraz pokazuje powierzchnię o silnym zaangażowaniu tektonicznym, charakteryzującą się obecnością uskoków o niewielkim zrzucie. W przedstawionej wersji kolor zielony prezentuje uskoki o niedużym przemieszczeniu pionowym, raczej strefy spękań, kolor czerwony odzwierciedla największy ich zrzut (kilka do kilkunastu metrów). Uskoki o stosunkowo dużym zrzucie są widoczne w obszarze lokalizacji trzech pozytywnych otworów — S-1, S-2 i S-3K oraz w strefie między otworem S-4 i S-2.

Mapę ekstrakcji amplitudy fali sejsmicznej odbitej od powierzchni karbońskiej serii zbiornikowej I przedstawia ryc. 7. Kolor niebieski pokazuje strefy występowania ujemnej amplitudy fali sejsmicznej, które można wiązać ze wzro-



Ryc. 4. Mapa krawędzi obserwowanych na powierzchni odzwierciedlającej strop utworów franu (Dfr)
Fig. 4. Edge map of the top of the Devonian complex — Frasnian (Dfr)



Ryc. 5. Mapa krawędzi obserwowanych na powierzchni odzwierciedlającej strop utworów famenu (Dfm)
Fig. 5. Edge map of the top of the Devonian complex — Famennian (Dfm)

stem zailenia lub obecnością uskoków. Wynika to z faktu, iż w strefie złoża Stężycza dodatnia amplituda fali sejsmicznej odzwierciedla serie piaszczyste (efekt integracji danych sejsmicznych z sejsmogramem syntetycznym), a ujemna amplituda fali sejsmicznej pokazuje obszary występowania utworów ilasto-mułowcowych. Jednakże ujemna amplituda fali będzie rejestrowana również w miejscach występowania uskoków, co jest efektem zastosowania autokorelacji (Brown, 1988).

Porównanie mapy krawędzi i amplitudy fali sejsmicznej pozwala na rozdzielenie tych stref, a ich wnikliwa analiza daje możliwość jasnego ich zdefiniowania.

W obrazie amplitudowym fali sejsmicznej odbitej od powierzchni serii zbiornikowej, występująca strefa maksymalnej ujemnej amplitudy fali sejsmicznej między otwora-

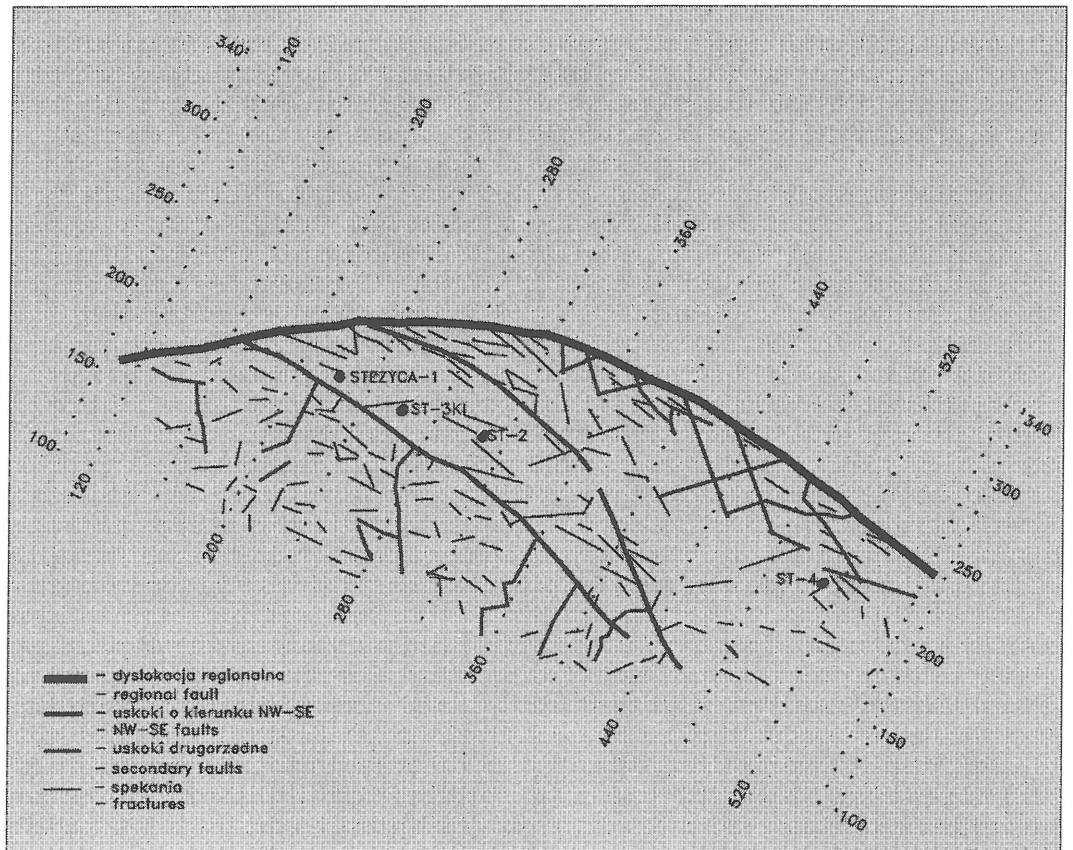
mi S-2 i S-3K jest związana zarówno z obecnością uskoków, jak również strefą zmienności facji. Strefa ta może mieć charakter uszczelniający, dzieląc kulminację struktury Stężycza na oddzielne dwa elementy. Wynika to z danych zarejestrowanych na mapach atrybutów fali sejsmicznej, jak i na pionowych profilach sejsmicznych (ryc. 2, 6, 7). Strefa ta, w obrazie falowym pionowego profilu sejsmicznego (ryc. 2) pokazuje obszar prawie całkowitego zaniku granicy sejsmicznej I.

Podobny charakter może mieć strefa maksymalnych ujemnych wartości amplitudy fali sejsmicznej zarejestrowana między otworami S-4 i S-2. Jest to najprawdopodobniej strefa występowania utworów o większym stopniu zailenia, a także obecności uskoków o niewielkim zrzucie oraz spekań (ryc. 6, 7).



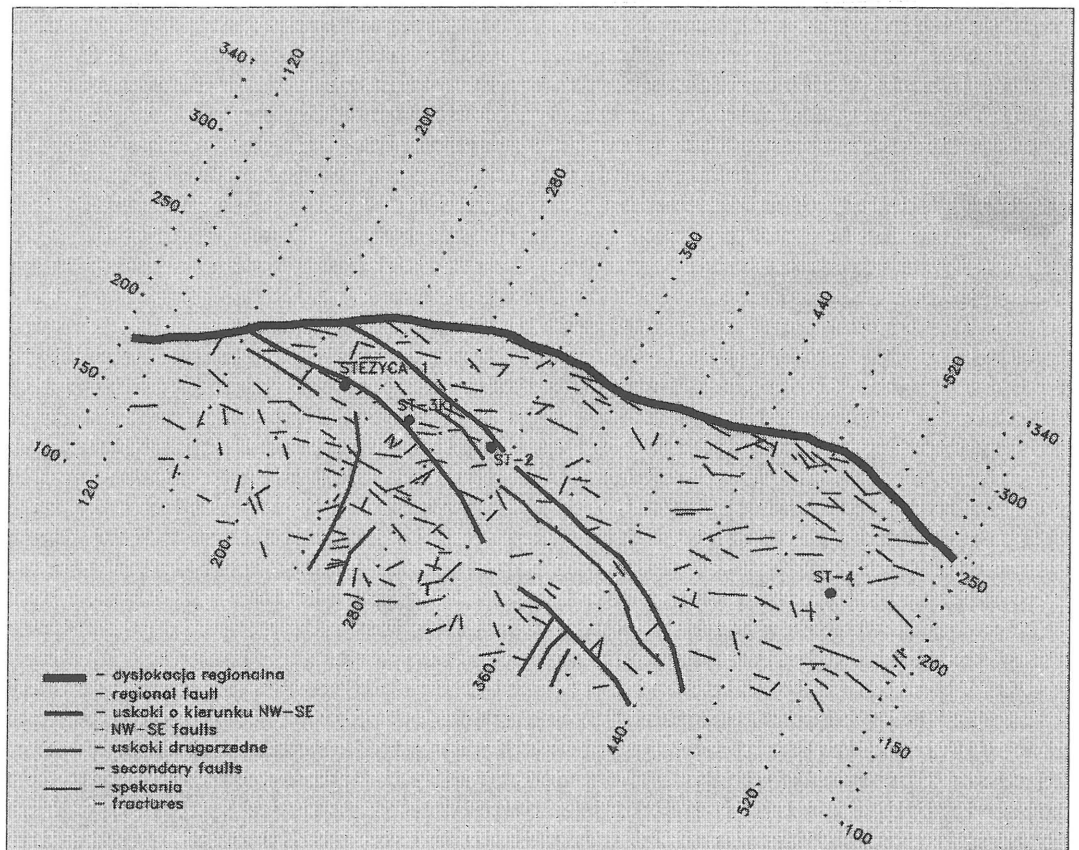
Ryc. 4a. Interpretacja geologiczna mapy krańdźi obserwowanych na powierzchni odzwierciedlającej strop utworów franu (Dfr)

Fig. 4a. Geological interpretation of the edge map of the top of the Devonian complex — Frasnian (Dfr)



Ryc. 5a. Interpretacja geologiczna mapy krańdźi obserwowanych na powierzchni odzwierciedlającej strop utworów famenu (Dfm)

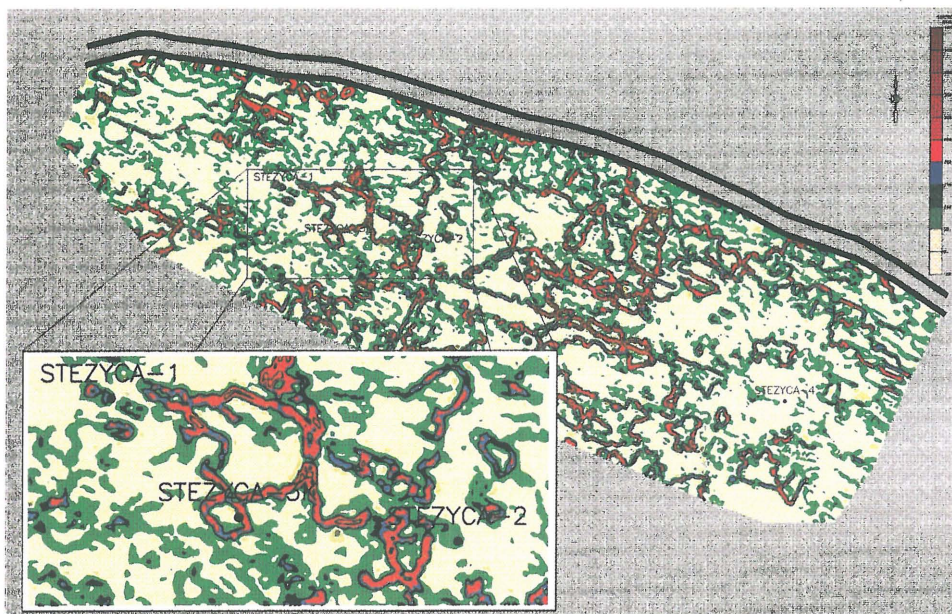
Fig. 5a. Geological interpretation of the edge map of the top of the Devonian complex — Famennian (Dfm)



Interpretacja facjalna

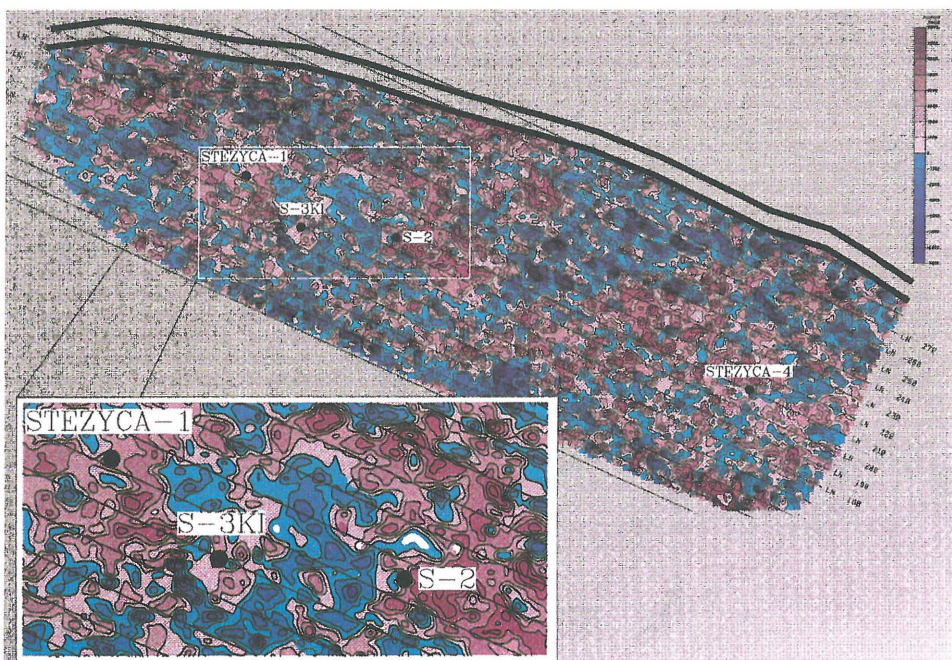
Podstawę analizy facjalnej (szersze omówienie zasad interpretacji facjalnej i kryteriów wydzielenia facji sejsmicznej znajduje się w pracy Kuc i in., 1997) stanowi mapa

ekstrakcji amplitudy fali sejsmicznej odbitej od powierzchni karbońskiej serii zbiornikowej I (ryc. 7). Wzrost amplitudy fali sejsmicznej jest proporcjonalny do wzrostu porowatości utworów budujących tę serię (Brown, 1988). W przypadku analizowanego złoża amplituda dodatnia fali sejsmicznej



Ryc. 6. Mapa krawędzi obserwowanych na powierzchni obrazującej strop karbońskiej serii zbiornikowej I

Fig. 6. Edge map of the top of the Carboniferous reservoir I



Ryc. 7. Mapa ekstrakcji amplitudy fali sejsmicznej odbitej od stropu powierzchni karbońskiej serii zbiornikowej I

Fig. 7. Amplitude extraction map of the top of the Carboniferous reservoir I

(kolor czerwony) obrazuje korzystne właściwości zbiornikowe.

Mapa ekstrakcji amplitudy wyraźnie wskazuje na obecność trzech oddzielnych stref występowania amplitudy dodatniej fali sejsmicznej:

- strefę otworu Stężycy-4,
- strefę otworu Stężycy-2,
- strefę otworu Stężycy-1.

Analiza zmian wartości dodatniej amplitudy fali sejsmicznej pozwala na stwierdzenie, iż najbardziej korzystna dla poszukiwań jest strefa druga, w której został zlokalizowany otwór Stężycy-2. W jej obrębie amplituda dodatnia fali ma charakter regularny i osiąga największe wartości, co wskazuje na jednorodność występującej tu facji oraz stosunkowo lepsze właściwości zbiornikowe. Jako strefę drugoplanową należy uznać rejon otworu Stężycy-1. Bardzo zmienne wartości amplitudy dodatniej fali sejsmicznej zarejestrowanej w strefie otworu Stężycy-4 oraz licznie występujące tu wartości ujemne sugerują obecność utworów o dużej zmienności facji z przewagą utworów piaszczystych.

Reasumując można stwierdzić, iż mapy atrybutów fali sejsmicznej pozwalają na:

- bardzo szybką ocenę budowy strukturalnej analizowanego elementu,
- określenie pionowej i poziomej kontynuacji uskoków,
- określenie kierunku nachylenia płaszczyzny uskoku,
- identyfikację uskoków o niewielkim zrzucie,
- obserwowanie zasięgu występowania stref zaburzeń tektonicznych, których znajomość pozwala na prawidłowe określenie zasięgu występowania złoża,
- określenie zmian facjalnych w obrębie analizowanego zbiornika.

Literatura

- BROWN A.R. 1988 — Interpretation of Three-Dimensional Seismic Data, AAPG Memoir, 42.
 GÓRSKI M. z zespołem, 1996 — Opracowanie badań sejsmicznych 3D-rejon Stężycy. GEOFIZYKA Toruń.
 JONES G. & KNIPE R.J. 1996 — First Break, 14: 448–461.
 KACZYŃSKI J. 1994 — Złoża węglowodorów w rejonie struktury Stężycy. Biul. Nauk.-Techn., Toruń, 14–18.
 KUC B. ZAGÓRSKI J. & MYŚLIWIEC M. 1997 — Prz. Geol., 45: 43–50.