

Tomasz Plewka, Jadwiga Jarzyna

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie

Przetwarzanie i interpretacja pomiarów elektrycznego obrazowania ściany otworu w utworach klastyczno-węglanowych pod kątem wyznaczania struktur *breakouts*

Badania geofizyczne mają na celu dostarczenie dokładnej informacji dotyczącej budowy geologicznej (strukturalnej oraz tektonicznej) i własności górotworu. Analiza geomechaniczna ośrodka skalnego wykonywana jest na podstawie wyników geofizyki otworowej i pozwala zintensyfikować procesy wydobywania i produkcji węglowodorów. W artykule przedstawiono zasady elektrycznego obrazowania ścianki otworu wiertniczego, wykonanego za pomocą sondy FMI-HD firmy Schlumberger. Dane obejmowały utwory dolnego paleozoiku (kambru – syluru) pochodzące z dwóch głębokich otworów wiertniczych basenu lubelskiego. Zaprezentowano proces przetwarzania surowych danych, a także przykłady ich analizy i interpretacji ze szczególnym uwzględnieniem wyznaczenia struktur *breakouts*. Na tej podstawie możliwe było określenie kierunków głównych naprężeń poziomych oraz zidentyfikowanie stref anomalnych naprężeń w górotworze.

Słowa kluczowe: elektryczne obrazowanie ścianki otworu, FMI-HD, struktury *breakouts*, szczeliny indukowane, strefy anomalnych naprężeń.

Electrical borehole wall imaging – data processing and breakouts focused interpretation in clastic-carbonate rock masses

The fundamental aim of the geophysical survey is to acquire accurate information regarding the geology (structure and tectonics) as well as the properties of the rock mass. The geomechanical analysis of the rock mass is also relevant. It enables development and production optimization of the hydrocarbon reservoir. In the following paper the principles of electrical borehole wall imaging performed with the FMI-HD tool produced by Schlumberger were presented. The data comprised the Early Paleozoic rocks (Cambrian and Silurian) of two deep wells drilled in the Lublin Basin area. The processing of raw data together with the interpretation of examples, focusing on the identification of breakouts, were the key part of this paper. Based on qualitative interpretation, it was possible to evaluate the principal horizontal stresses directions, as well as identify the zones of anomalous stresses in the Lublin Basin region.

Key words: electrical borehole imaging, FMI-HD, breakouts, induced fractures, anomalous stress zones.

Podstawy elektrycznego obrazowania ścianki otworu oraz opis sondy

Procesy poszukiwania i eksploatacji niekonwencjonalnych złóż węglowodorów wymagają zastosowania nowoczesnych technologii i urządzeń, które dostarczą informacji o budowie geologicznej, a także pozwolą ocenić własności zbiornikowe oraz geomechaniczne obszaru badań. Sonda FMI-HD firmy Schlumberger (www.schlumberger.com), rejestrująca zmiany oporności skał tworzących ściankę otwo-

ru wiertniczego, jest takim urządzeniem. W wyniku pomiaru tą sondą, podobnie jak i innymi urządzeniami tego typu, np. XRMI firmy Halliburton (www.halliburton.com), uzyskuje się wysokorozdzielczy zestaw danych pomiarowych, przede wszystkim mikroprofilowań oporności [13]. Interpretacja danych dostarczonych przez elektryczne obrazowanie ścianki otworu łącznie z profilowaniami geofizyki wiertni-

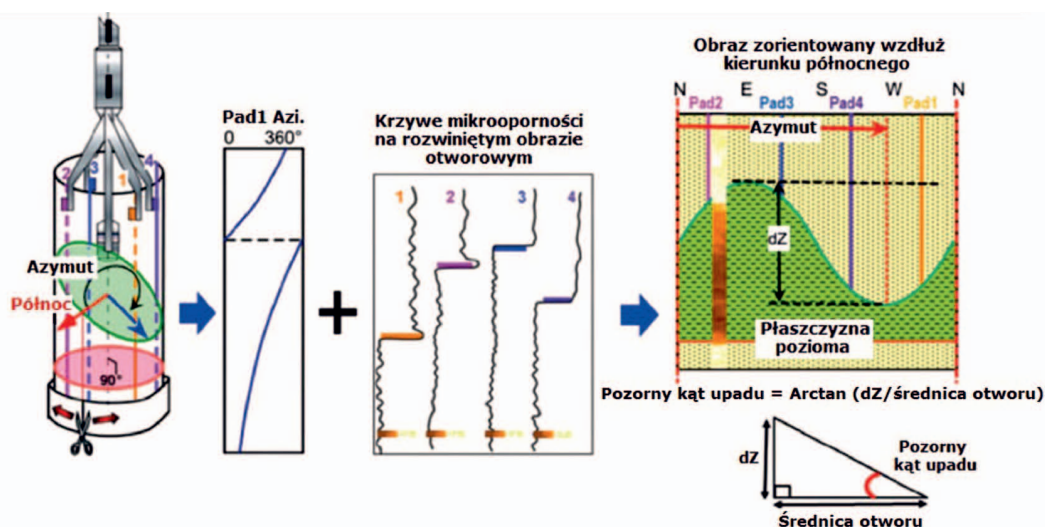
czej umożliwiła obszerną charakterystykę modelu złoża, pozwalając również na późniejszą optymalizację eksploatacji jego zasobów [4].

Podstawowy etap analizy obrazów otworowych powstałych w wyniku przetwarzania zarejestrowanych krzywych mikroprofilowań oporności wiąże się z wyznaczeniem kąta i azymutu upadu obiektów geologicznych i sedimentacyjnych (takich jak: szczeliny naturalne i wzbudzone, uskoki czy struktury *breakouts*) przeciętych otworem wiertniczym. Schemat sposobu definiowania powierzchni geologicznej, orientowania punktów pomiarowych, a także przedstawiania trójwymiarowego odwzorowania ścianki otworu na płaszczyźnie zaprezentowano na rysunku 1. Wykrycie płaszczyzny możliwe jest w wyniku zarejestrowania przynajmniej trzech niewspółliniowych punktów, które stanowią przecięcie szukanej powierzchni geologicznej ze ścianką otworu wiertniczego aproksymowaną przez walec. Do obliczenia wartości kąta i azymutu upadu rozważanej struktury konieczne jest pomierzenie co najmniej trzech krzywych mikrooporności w różnych kierunkach radialnych. Pomierzone krzywe są ze sobą korelowane w celu identyfikacji głębokości gwałtownej zmiany oporności na każdej z nich. Zidentyfikowane anomalie wskazują na obecność danego obiektu w profilu otworu. Dla precyzyjnego określenia azymutu upadu powierzchni geologicznych wymagane jest zorientowanie wyznaczonych punktów głębokościowych w przestrzeni, czemu służy moduł inklinometryczny, który wchodzi w skład sondy pomiarowej [14]. Aby przedstawić pomierzony obraz 3D ścianki otworu na dwuwymiarowej płaszczyźnie, należy rozciąć cylindryczne odwzorowanie odwiertu wzdłuż kierunku północnego w przypadku otworu pionowego lub punktu *top-of-hole* dla otworu krzywionego oraz je rozwinąć. Ślad przecięcia nachylonej warstwy geologicznej i otworu jest elipsą, któ-

ra w wyniku rozwinięcia obrazu 3D na płaszczyznę przyjmuje kształt sinusoidy [4]. Pozorny upad danej powierzchni może zostać obliczony przy użyciu zależności łączącej amplitudę (dZ) rozważanej sinusoidy ze średnicą otworu wiertniczego (rysunek 1).

Postęp technologiczny sprawił, że wieloramienne upadomierze zostały zastąpione przez nowoczesne sondy do obrazowania ścianki otworu, z których wyniki umożliwiają utworzenie obrazu zmian oporności wnętrza otworu. Podstawowy podział urządzeń tego typu na sondy do akustycznego i elektrycznego obrazowania ścianki otworu wiertniczego podkreśla odmienną zasadę ich działania oraz inne właściwości ośrodka skalnego i płuczki w otworze wykorzystywane podczas pomiaru [9]. W niniejszym artykule wykorzystano rejestracje wykonane sondą FMI-HD.

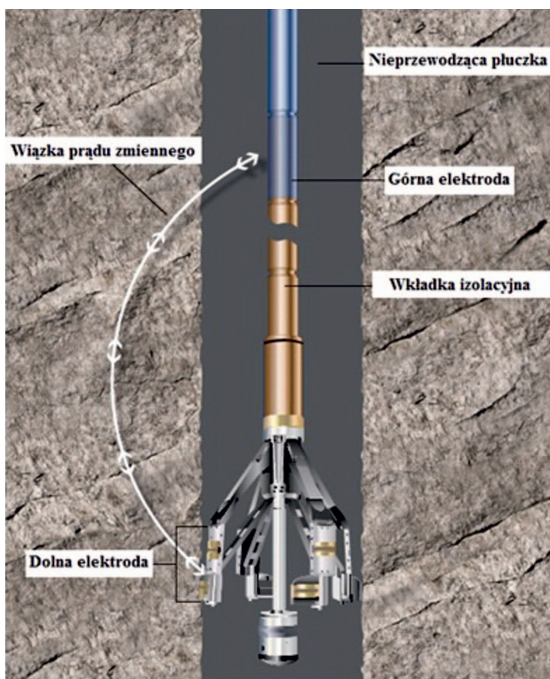
Sonda FMI-HD (*high-definition formation microimager*) jest nowoczesnym urządzeniem umożliwiającym pomiary zarówno w warunkach płuczki przewodzącej, jak i w środowisku nieprzewodzącym. Pomiar w płuczce przewodzącej jest możliwy, gdy jej oporność nie przekracza $50 \Omega\text{m}$. W przypadku środowiska nieprzewodzącego oporność formacji skalnej musi być odpowiednio wysoka, a stosunek oporności osnowy oleistej użytej w płuczce do wody – niski [2]. Urządzenie składa się z korpusu oraz czterech ramion hydraulicznie dociskanych do ścianki otworu (rysunek 2). Każde ramię wyposażone jest w pad (przytwierdzony do niego na stałe) oraz znajdujący się po jego lewej stronie flap (wysuwany podczas pomiarów). Oba wspomniane elementy stanowią przewodzące podkładki, na których znajdują się odizolowane od nich 24 elektrody pomiarowe, ułożone w dwóch rzędach po 12 (rysunek 3) [9]. Pomiary wykonywane są co $2,5 \text{ mm}$ i zapewniają rozdzielczość w pionie i poziomie równą około 5 mm . Radialny zasięg profilowania sondą FMI-HD jest niewielki



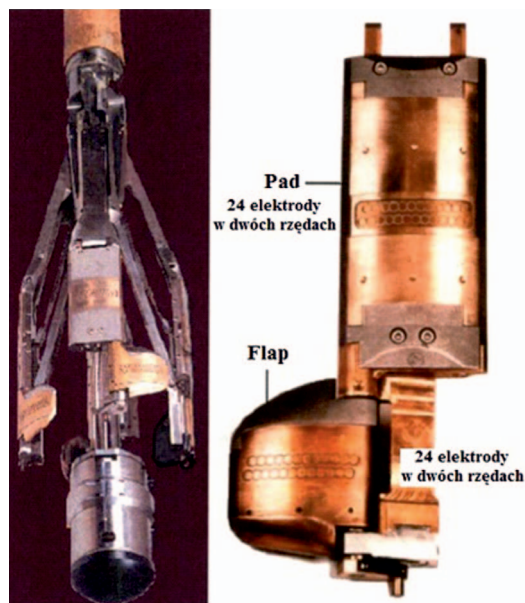
Rys. 1. Schemat przekształcenia otworowego obrazu 3D na powierzchnię boczną walca aproksymującego odwiert oraz zasada wyznaczenia wielkości kąta upadu płaszczyzny geologicznej przecinającej otwór wiertniczy [8, zmienione]

i wynosi około 1 cm. Pomiar polega na zarejestrowaniu 192 wartości natężenia prądu, które następnie przeliczane są na przewodność bądź oporność i prezentowane w postaci krzy-

wych mikrooporności. Mierzone wartości zależą od lokalnych zmian właściwości elektrycznych skał przecinających otwór wiertniczy [2].



Rys. 2. Budowa sondy FMI-HD [2, zmienione]



Rys. 3. Dolna część sondy FMI-HD (po lewej) oraz schemat rozmieszczenia elektrod pomiarowych na padzie i flapie urządzenia (po prawej) [8, zmienione]

Zarys budowy geologicznej obszaru badań

Basen lubelski jest przedmiotem zainteresowania geologów złożowych ze względu na występujące karbońskie pokłady węgla kamiennego oraz możliwy potencjał węglowodorowy, w szczególności obecność łupków sylurskich.

Basen lubelski stanowi południowo-wschodnią część układu basenów sedymentacyjnych, które powstały na przełomie proterozoiku i paleozoiku na obszarze obejmującym krawędź kratonu wschodnioeuropejskiego. Rozważany region jest niezwykle urozmaicony, zarówno pod względem budowy tektonicznej, strukturalnej, jak i litologii [10]. Głębokie wiercenia pozwoliły w pewnym stopniu poznać historię tektoniczną basenu lubelskiego i utworzyć jego profil litostratygraficzny. W niniejszym artykule zarys budowy geologicznej basenu lubelskiego przybliżono na podstawie danych pochodzących z otworu Busówno IG 1. Prekambr tworzący południowo-zachodni skłon kratonu wschodnioeuropejskiego przykryty jest utworami dolnego kambru, które deponowane były w warunkach maksymalnej transgresji morskiej. Osady środkowego i górnego kambru związane są z etapem przesuwania się linii

brzegowej w kierunku morza, którego następstwem jest depozycja skał piaskowcowych i mułowcowych w warunkach płytkiego, otwartego akwenu i ich silna erozja. Utwory ordowiku przykrywają zwietrzałe osady kambru środkowego. Zostały one zdeponowane w warunkach morskiego przybrzeża związanego z interakcją prądów dennych na tym obszarze [12]. Reprezentowane są głównie przez skały klastyczne (piaskowce kwarcowe, utwory iłowcowo-mułowcowe i zlepieńce) oraz węglanowe (wapienie i margle). Skały ordowiku przykryte są sylurskimi osadami morskimi zdominowanymi przez skały klastyczno-węglanowe. Charakterystyczne są osady iłowcowe przewarstwione mułowcami dolomityczno-wapiennymi oraz marglistymi [6]. Depozycja utworów kambryjsko-sylurskich nastąpiła w czasie silnej aktywności tektonicznej na obszarze basenu lubelskiego [7].

Dane pomiarowe wykorzystane przy przygotowaniu prezentowanej pracy pochodzą z dwóch otworów (A i B) basenu lubelskiego i obejmują przedział głębokościowy odpowiadający skałom dolnego paleozoiku, od kambru do syluru.

Przetwarzanie danych

Przetwarzanie pomierzonych danych elektrycznego obrazowania ścianki otworu oraz ich późniejsza interpretacja

zostały wykonane w programie Techlog[®] firmy Schlumberger. Posłużono się modulem Wbi (*Wellbore Imaging*), wy-

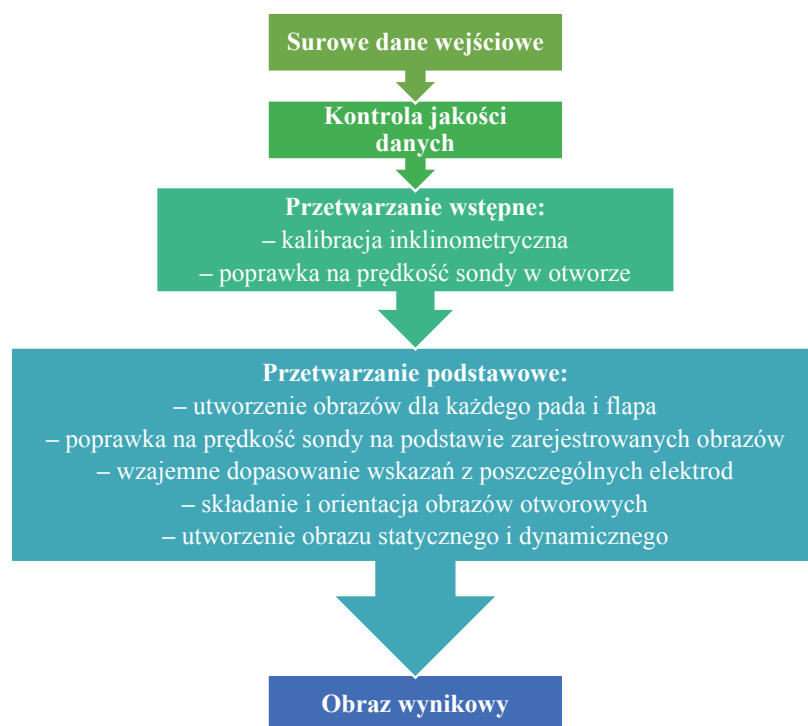
korzystującym zbiór gotowych narzędzi zaprojektowanych do przetwarzania obrazów oraz ich jakościowej i ilościowej analizy. Dostępny w programie kreator obróbki danych (Image Processing Wizard) stanowi zestaw procedur, które mogą być modyfikowane w zależności od doświadczenia interpretatora.

Wczytane dane pomiarowe mają charakter pierwotny i występują w postaci niezorientowanych obrazów ścianki otworu uzyskanych dla poszczególnych padów i flapów na podstawie krzywych mikrooporności pochodzących z 12 kolumn elektrod pomiarowych. Przed właściwym etapem przetwarzania obrazów sondy przeprowadzono kontrolę jakości danych, która polegała na sprawdzeniu wskazań poszczególnych krzywych geofizyki wiertniczej (w szczególności profilowań średnicy) oraz wartości oporności pozornych widocznych na obrazach otworowych. Następnie wykonano przetwarzanie wstępne, na które składała się kalibracja inklinometryczna oraz poprawka na prędkość sondy. Etap kalibracji inklinometrycznej obejmował wprowadzenie poprawki na deklinację magnetyczną, która spowodowała, że pomiary zostały zorientowane względem północy geograficznej, a nie magnetycznej. Poprawka wykorzystuje wartości deklinacji, inklinacji oraz całkowitego natężenia ziemskiego pola magnetycznego, które wiążą się z czasem i dokładnym miejscem wykonania pomiarów. Głębokość podawana przy pomiarach sondami geofizycznymi mierzona jest z użyciem kabla geofizycznego. Zazwyczaj prędkości poruszającej się w górę otworu sondy i zwijanego kabla nie są sobie równe. Gdy prędkość urządzenia jest większa, dane ulegają kompresji. Z kolei mniejsza szybkość sondy sprawia, że zarejestrowany obraz jest rozciągnięty. Powoduje to konieczność wprowadzenia poprawki na prędkość urządzenia pomiarowego. W wyniku jej zaaplikowania uzyskano nową skalę głębokości, poprawioną o przesunięcia głębokościowe związane z kompresją bądź rozciągnięciem obrazów otworowych.

Etap przetwarzania podstawowego danych elektrycznego obrazowania ścianki otworu obejmował kilka procedur: generowanie obrazu dla każdego pada i flapa urządzenia pomiarowego, zaaplikowanie poprawki na prędkość sondy bazującej na zarejestrowanych obrazach oraz wzajemne dopasowanie wskazań z poszczególnych elektrod sondy. Obrazy otworowe dla konkretnego pada/flapa tworzone są w wyniku połączenia danych pochodzących ze znajdujących się na nim rzędów elektrod pomiarowych. Proces wzajemnego dopasowania wskazań z poszczególnych elektrod sondy miał na celu wyeliminowanie

błędnych wskazań urządzenia pomiarowego oraz harmonizację poszczególnych obrazów. Odbyło się to poprzez poprawienie wartości z pojedynczych kolumn elektrod pomiarowych na każdym uzyskanym obrazie oraz dopasowanie tych wartości między sobą. Kolejnym etapem przetwarzania było złożenie i zorientowanie obrazów otworowych. W rezultacie otrzymano realistyczną wizualizację całej powierzchni ścianki otworu. Wynikiem standaryzacji obrazów otworowych było utworzenie obrazu statycznego i dynamicznego, na których podstawie prowadzona jest analiza i interpretacja zarówno jakościowa, jak i ilościowa. Obraz statyczny wygenerowano, przypisując całemu interwałowi pomiarowemu skalę barw składającą się z odcieni brązu, i wykorzystano go podczas interpretacji litologicznej i litostratygraficznej. Z kolei obraz dynamiczny powstał poprzez przyporządkowanie wspomnianej palety barw do ściśle określonego przez interpretatora okna pomiarowego obejmującego pewien przedział głębokości i posłużył do identyfikacji szczelin, struktur *breakouts* oraz warstwowania w obrębie większych kompleksów skalnych. Normalizację dynamiczną wykonuje się z myślą o uwypukleniu szczegółowych informacji (granic warstw, obiektów sedymentologicznych), które mogły być niewidoczne na obrazach statycznych ze względu na niewystarczający kontrast barw. Oprócz przedstawionego schematu przetwarzania podstawowego istnieje możliwość zastosowania zaawansowanych procedur post-processingu.

Dane pochodzące z otworów A i B przetworzono zgodnie ze schematem przetwarzania podstawowego (rysunek 4).



Rys. 4. Uproszczony schemat przetwarzania podstawowego danych pochodzących z sondy FMI-HD

W ramach kontroli jakości danych przeprowadzonej przed właściwą edycją surowych rejestracji zmodyfikowano przedział głębokościowy brany pod uwagę w dalszej części interpretacji ze względu na fakt, że pomiar w górnym i dolnym fragmencie profilu został wykonany w zarzurowanej części otworu. Do wyznaczenia składowych pola magnetycznego niezbędnych do wprowadzenia poprawki na deklinację magnetyczną wykorzystano internetowy kalkulator korzystający z modelu IGRF [5]. Poprawka na prędkość sondy w programie Techlog® została wprowadzona automatycz-

nie na podstawie danych pochodzących z modułu inklinometrycznego. Wysoka jakość danych pomiarowych sprawiła, że nie zmodyfikowano również parametrów procedury dopasowania obrazów pochodzących z poszczególnych elektrod pomiarowych. Wizualizacje wynikowe na etapie składania obrazów zostały zorientowane względem północy geograficznej. Obraz statyczny i dynamiczny wykonano dla danych pochodzących z obu otworów, przy czym podczas normalizacji dynamicznej wykorzystano okno pomiarowe o długości 1 m [8, 15].

Interpretacja jakościowa i ilościowa

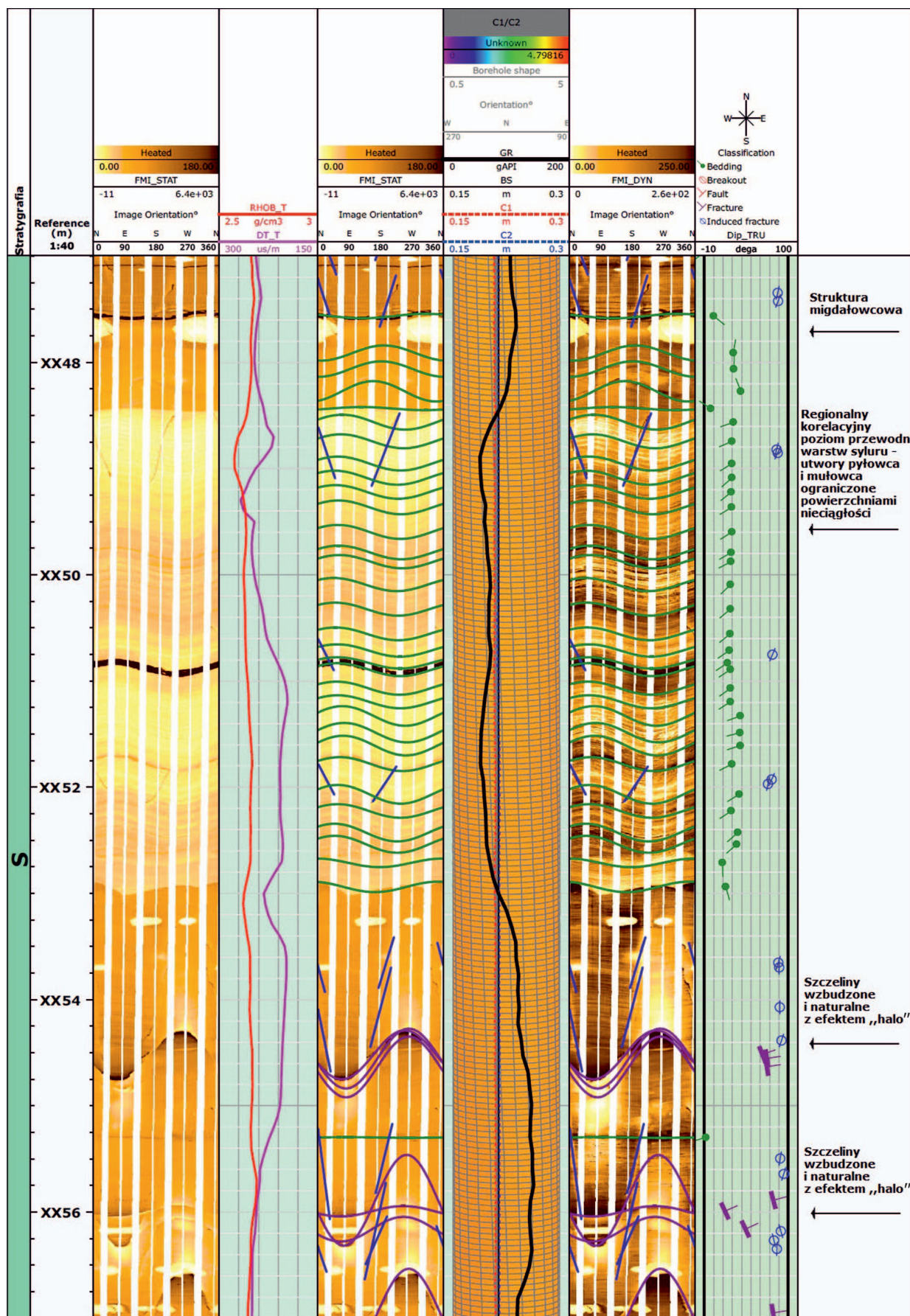
Interpretacja jakościowa polegała na jednoczesnej analizie obrazu statycznego i dynamicznego wraz z dostępnymi profilowaniami geofizyki wiertniczej. Analizę wykonano pod kątem rozpoznania elementów strukturalnych i sedymentacyjnych. Dwie początkowe ścieżki na rysunkach 5–7 zawierają skalę głębokościową oraz profil stratygraficzny. Na kolejnych ścieżkach: 3, 5 i 7 umieszczono obraz statyczny bez interpretacji oraz obrazy statyczny i dynamiczny po interpretacji. Na rysunkach 5–7 zestawiono także profilowanie gęstości objętościowej RHOB i akustyczne DT (ścieżka 4) oraz profilowanie naturalnej promieniotwórczości GR naniesione na obraz kształtu otworu wraz z pomiarami średnicy nominalnej BS i średnic pomierzonych w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach C1 i C2 (ścieżka 6). Ponadto na ścieżce 8 przedstawiono wykres wektorowy wyinterpretowanych struktur, niosący informację o kątach upadu i azymutach. Zastosowano następujące oznaczenia: *bedding* – granica warstw, *breakout* – struktura *breakout*, *fault* – uskoki, *fracture* – szczelina naturalna i *induced fracture* – szczelina wzbudzona.

Program Techlog® umożliwia przeprowadzenie interpretacji w sposób interaktywny. Identyfikacja obiektów wykonywana jest poprzez wybór co najmniej trzech punktów na obrazie statycznym bądź dynamicznym i dopasowanie częściowej lub pełnej sinusoidy do danej struktury. Poszczególne obiekty mogą być także zinterpretowane przy użyciu fragmentu linii prostej lub wielokąta. Przypisanie określonego kształtu do danej struktury powoduje automatyczne wyznaczenie dla niego kąta i azymutu kąta upadu. Granice warstw, szczeliny naturalne i uskoki zinterpretowano, używając pełnych sinusoid koloru odpowiednio: zielonego, fioletowego i czerwonego. Z kolei szczeliny wzbudzone i struktury *breakouts* oznaczono jako fragmenty linii prostych koloru niebieskiego oraz wielokąty barwy czerwonej. Ciemne kolory na obrazach wynikowych sugerują obiekty dobrze przewodzące prąd elektryczny, podczas gdy jasne reprezentują struktury wysokooporowe.

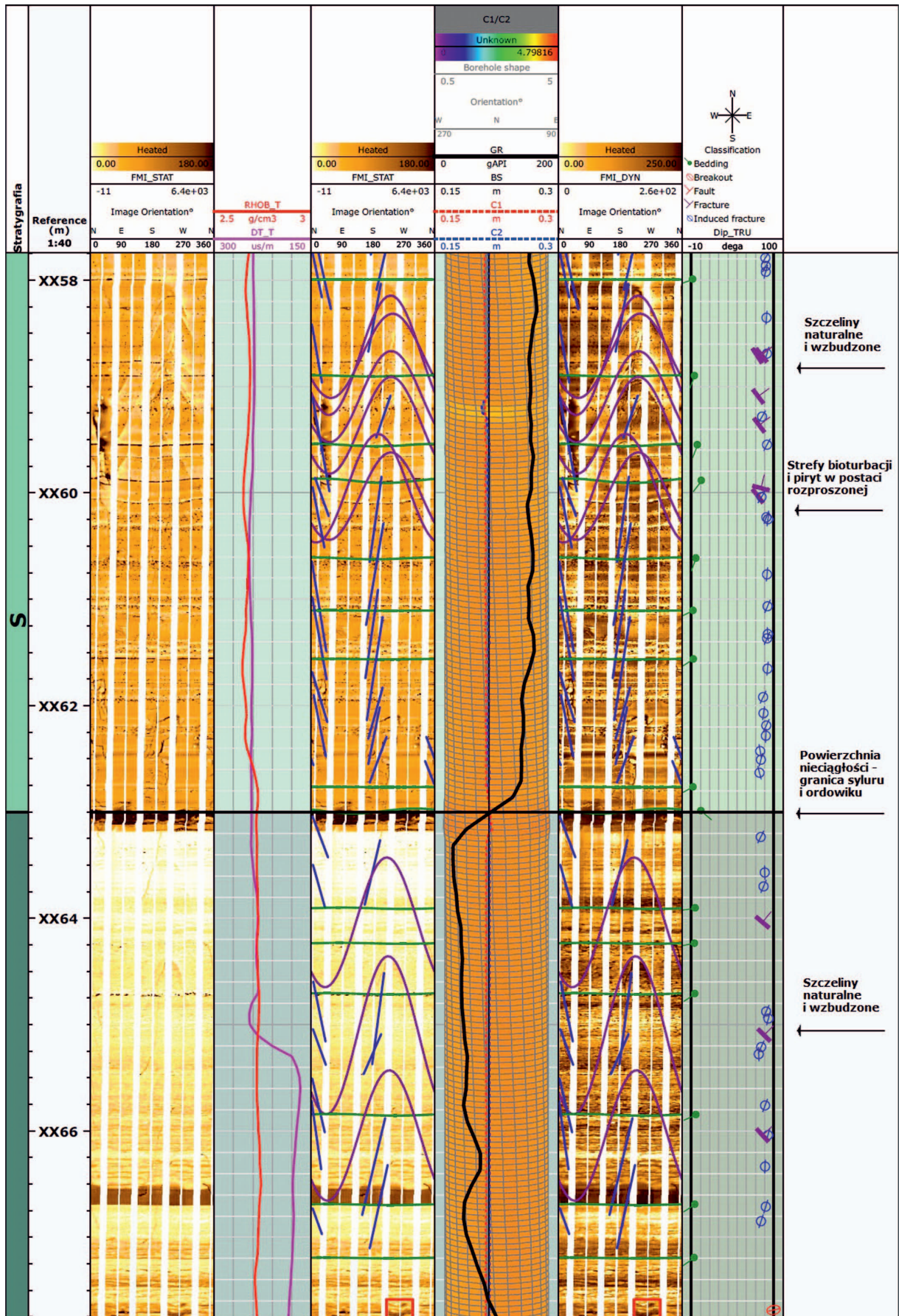
Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono wyniki interpretacji w wybranych interwałach otworu A o sumarycznej miąższo-

ści około 10 m. Na rysunku 5 zaprezentowano w całości warstwy sylurskie basenu lubelskiego. W ich obrębie zauważyć można wysokooporowy kompleks o miąższości nieco powyżej 4 m (xx48,50–xx52,87), który wyróżnia się obniżonymi wskazaniami profilowania GR (niska zawartość minerałów ilastych), a także zróżnicowanymi wartościami czasu interwałowego DT. Strefa ta, od góry i od dołu oddzielona od otaczających warstw iłowcowo-mułowcowych powierzchniami niezgodności, składa się z wielu cienkich warstewek, których kąty upadu i azymuty są zgodne. Rozważany kompleks stanowi regionalny korelacyjny poziom przewodni warstw sylurskich w obrębie całego basenu lubelskiego [11]. Powierzchnie niezgodności świadczą o zmiennych warunkach depozycji osadów. Wysoka oporność wynika z obecności spojonych kalcytem utworów pyłowcowo-mułowcowych. W profilu rozważanego interwału widoczne są także charakterystyczne obiekty sedymentacyjne – konkretne wapienne (nodule). Są to elementy wysokooporowe, przyjmujące na obrazach kształty owalne o zmiennej wielkości i jasnej barwie, np. w interwałach o głębokości xx47,75 i xx53,25. W dolnej części zaprezentowanego przedziału głębokościowego obecne są niemal pionowe naturalne szczeliny, których powstanie związane jest z procesami tektonicznymi na tym obszarze w przeszłości geologicznej. Ponadto zauważyć można charakterystyczny efekt „halo”, widoczny na obrazach w postaci rozmytych, jasnych smug. Jest to rezultat konstrukcji sondy pomiarowej. Prąd, płynąc z elektrod pomiarowych (dolna część urządzenia) do elektrody referencyjnej (górna część urządzenia) i przechodząc przez wypełnioną kalcytem szczelinę, rejestruje wysoki kontrast oporności, który wpływa negatywnie na obraz wynikowy.

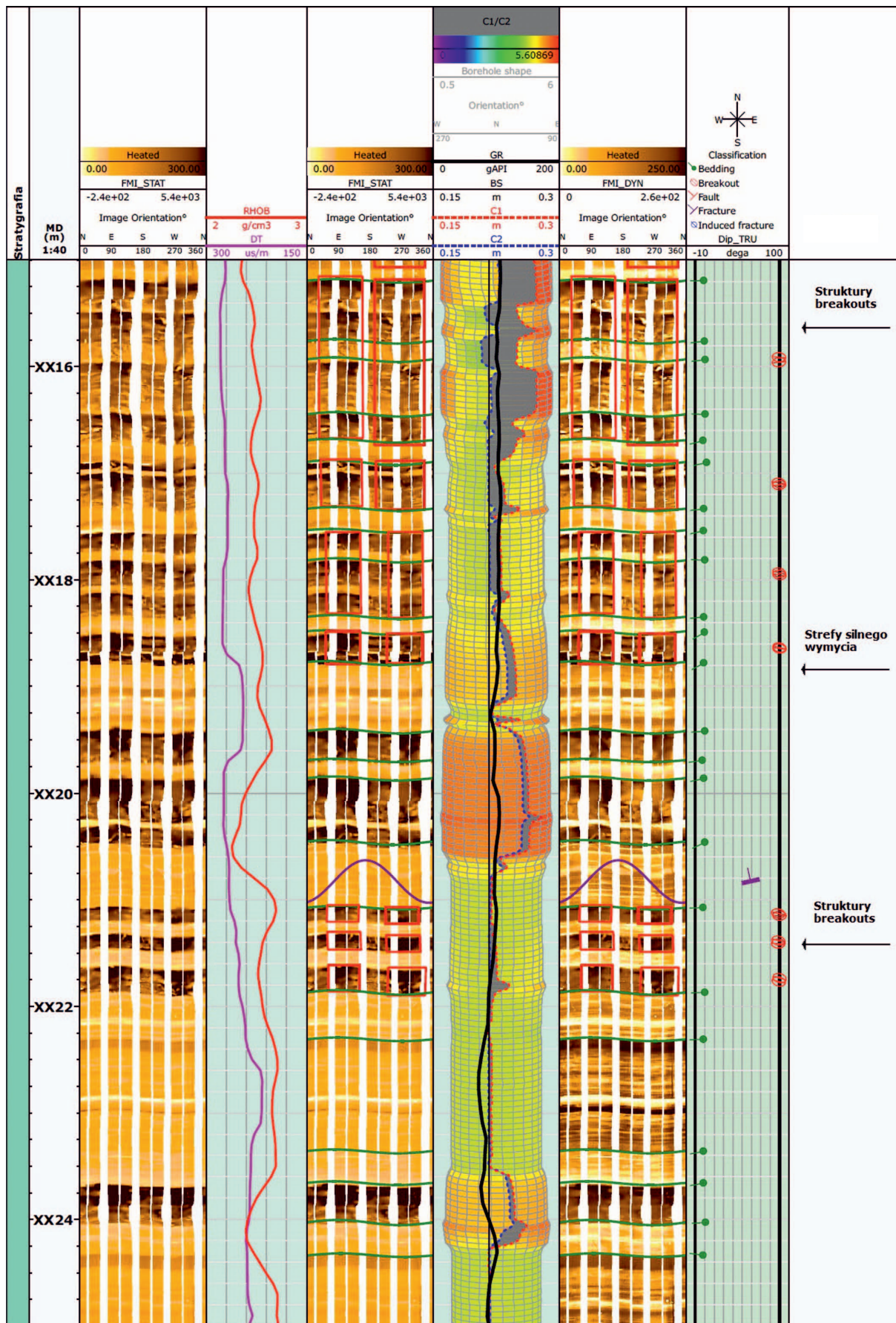
W środkowej części (xx63,00) zaprezentowanego na rysunku 6 interwału pomiarowego widać powierzchnię nieciągłości, którą utożsamiać można z erozyjną granicą oddzielającą leżące poniżej wapienie ordowickie od nadleżących łupków sylurskich. Zmiana litologiczna potwierdzona jest także przez wyraźny spadek wartości profilowania GR.



Rys. 5. Fragment otworu A. Sinusoidy koloru zielonego oznaczają granice warstw, czerwonego – uskoki, a fioletowego – szczeliny naturalne. Czerwonymi wielokątami zaznaczono struktury *breakouts*, a szczeliny wzbudzone oznaczono fragmentem linii prostej koloru niebieskiego



Rys. 6. Fragment otworu A. Sinusoidy koloru zielonego oznaczają granice warstw, czerwonego – uskoki, a fioletowego – szczeliny naturalne. Czerwonymi wielokątami zaznaczono struktury *breakouts*, a szczeliny wzbudzone oznaczono fragmentem linii prostej koloru niebieskiego



Rys. 7. Fragment otworu B. Sinusoidy koloru zielonego oznaczają granice warstw, czerwonego – uskoki, a fioletowego – szczeliny naturalne. Czerwonymi wielokątami zaznaczono struktury *breakouts*, a szczeliny wzbudzone oznaczono fragmentem linii prostej koloru niebieskiego

W obrębie warstw syluru zaobserwowano strefy bioturbacji, których obecność wiąże się bezpośrednio z zaburzeniem wewnętrznego układu warstw wynikającym z działalności organizmów żywych oraz z występowaniem rozproszonych, krystalicznych kongrecji pirytowych. Zarówno warstwy sylurskie, jak i ordowickie są silnie zeszczelinowane. Oprócz szczelin naturalnych obecne są także pęknięcia wzbudzone procesami wiercenia, które na obrazach wynikowych widoczne są jako obiekty liniowe, występujące po obu stronach otworu i biegnące niemal równoległe do jego osi [1]. Wy różnia je charakterystyczny brak ciągłości na ścianie otworu oraz ciemna barwa, związana z przewodzącym charakterem płuczki wnikażącej w otwarte przestrzenie szczelin.

Interwał głębokościowy przedstawiony na rysunku 7 obejmuje kompleks skał syluru otworu B. W tym przypadku zauważyć można charakterystyczną zmienność litologiczną, która potwierdzona jest wskazaniami zarówno profilowania gęstościowego RHOB, jak i akustycznego DT. W górnej i środkowej części interwału widać występujące naprzemiennie kompleksy podatnych na zniszczenie kompresyjnej skał ilastych i mułowcowych przewarstwione utworami

marglistymi z wyraźną domieszką spajającego kalcytu, który powoduje wzrost ich gęstości i oporności oraz czasu interwałowego fali P. Charakterystyczną cechą obrazów pochodzących z otworu B jest obecność kompresyjnego zniszczenia ścianki otworu (struktury *breakouts*) oraz stref silnych wymięć w obrębie utworów ilasto-mułowcowych. Klasyczne struktury *breakouts* (np. interwały o głębokości xx15,75 lub xx17,00) występują, podobnie jak szczeliny indukowane, po przeciwległych stronach ścianki otworu i są wynikiem zniszczenia mas skalnych przez ścięcie [17]. Warto w tym miejscu zaznaczyć, że obie struktury bezpośrednio wskazują na anizotropię głównych naprężeń poziomych obecnych w górotworze. Występowanie struktur *breakouts* może być związane z obniżonymi wskazaniami profilowania RHOB oraz wyższymi wartościami jednej ze średnic w stosunku do drugiej. Na obrazach zaobserwować można wówczas charakterystyczne rozmycie, świadczące o złym kontakcie padów/flapów z wykruszonym kompleksem skalnym. Bezpośrednim wskaźnikiem wymięć (np. interwały o głębokości xx18,75 lub xx20,00) jest powiększenie całego obwodu odwiertu, co doskonale widoczne jest na odwzorowaniu kształtu otworu.

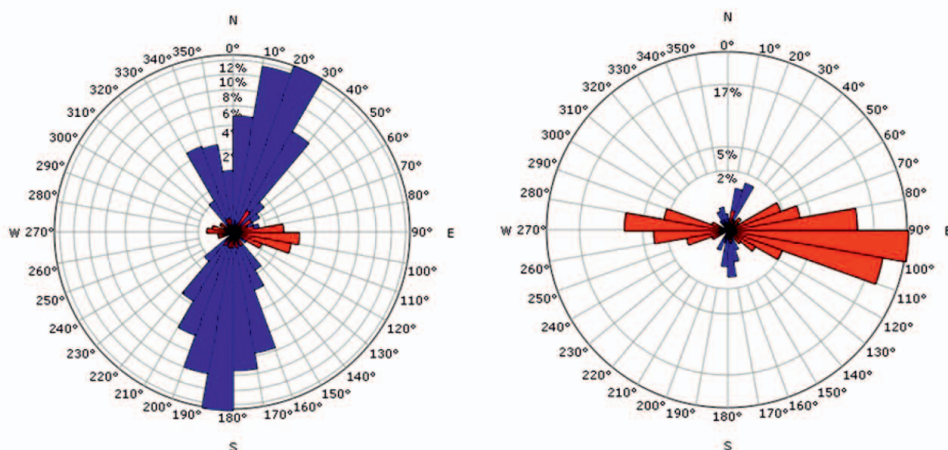
Geneza stref anomalnych, określenie kierunków poziomych naprężeń i stref anomalnych

Interpretację ilościową w otworach A i B wykonano, wykorzystując wykresy stereograficzne. Na rysunku 8 zaprezentowano wykresy stereograficzne zestawiające azymuty kąta upadu szczelin wzbudzonych (kolor niebieski) oraz struktur *breakouts* (kolor czerwony) dla obu rozważanych otworów. Na podstawie ich analizy określono kierunki głównych naprężeń poziomych.

Bezpośrednim wskaźnikiem zróżnicowania wartości (anizotropii) poziomych naprężeń głównych jest obecność szczelin wzbudzonych oraz struktur *breakouts* [16]. Rysunek 9 (po lewej) przedstawia związek maksymalnego (S_{Hmax}) i minimalnego (S_{Hmin}) poziomego naprężenia głównego z pojawiającymi się w ścianie otworu szczelinami indukowanymi oraz strukturami *breakouts*. Ich powstanie

jest wynikiem procesu wiercenia otworu wiertniczego w ośrodku skalnym. Szczeliny wzbudzone związane są z tensyjnym zniszczeniem skał. Pojawiają się na ścianie otworu w kierunku maksymalnego naprężenia poziomego (S_{Hmax}). Z kolei struktury zniszczeniowe typu *breakouts* powstają w wyniku przekroczenia wytrzymałości skały w warunkach *in situ* w kierunku minimalnego naprężenia poziomego (S_{Hmin}). Oba elementy pojawiają się w kierunkach wzajemnie do siebie prostopadłych [3].

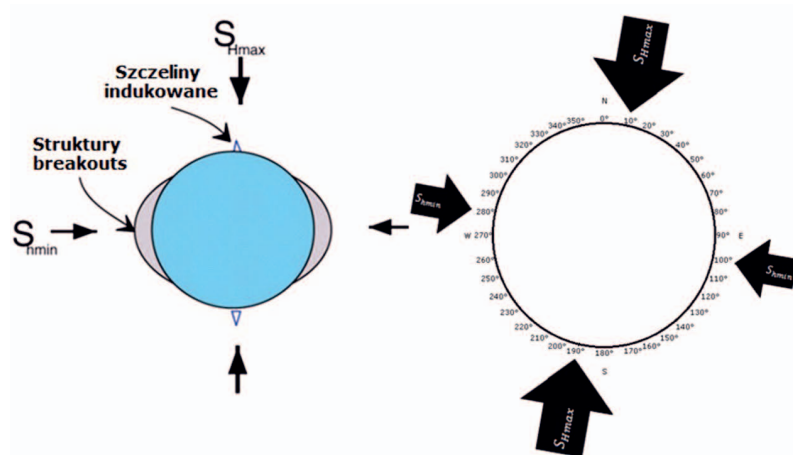
Analiza wykresów stereograficznych pozwoliła stwierdzić, że w otworze A występuje zdecydowanie więcej szczelin wzbudzonych niż struk-



Rys. 8. Zestawienie wykresów stereograficznych azymutów kąta upadu struktur *breakouts* i szczelin wzbudzonych dla otworu A (po lewej) i B (po prawej)

Pojawienie się otworu wiertniczego w górotworze powoduje zaburzenie występującego wokół odwiertu pola na-

tur zniszczenia kompresyjnego. Z kolei w otworze B zaobserwowano większą liczbę struktur *breakouts* niż szczelin wyindukowanych. Taki stan rzeczy jest wypadkową wielu czynników, do których zaliczyć można wytrzymałość na zniszczenie tensyjne i kompresyjne poszczególnych skał, anizotropię naprężenia w otworze, a także ciężar właściwy użytej podczas pomiarów płuczki. Charakterystyczną cechą zaprezentowanych zestawień bezpośrednich wskaźników naprężenia jest ich zgodność dla obu otworów, co sugeruje podobny rozkład pola naprężeń na obszarze basenu lubelskiego. Kierunek maksymalnego naprężenia głównego (S_{Hmax}) wynosi około 10 stopni, a minimalnego naprężenia głównego (S_{Hmin}) – w przybliżeniu 100 stopni. Azymuty głównych naprężeń poziomych przedstawiono na rysunku 9 (po prawej).



Rys. 9. Koncentracja głównych naprężeń poziomych wokół otworu wiertniczego z zaznaczonymi kierunkami tworzenia się szczelin indukowanych i struktur *breakouts* (po lewej) [8, zmienione]. Kierunki głównych naprężeń (S_{Hmax} i S_{Hmin}) określone na podstawie szczelin indukowanych i struktur *breakouts* w otworach A i B (po prawej)

Wizualizacje widoczne na rysunkach 10 i 11 stanowią zestawienie stref anomalnych naprężeń poziomych (ścieżka 3) z liczebnością wyinterpretowanych na etapie analizy

jakościowej struktur (ścieżki 4–7) oraz gęstością ich występowania w funkcji głębokości (ścieżki 8–11) dla obu rozważanych otworów. Na ścieżkach 1 i 2 umieszczono odpowiednio skalę głębokościową oraz profil stratygraficzny. Liczebność wydzielonych warstw, szczelin naturalnych i wzbudzonych oraz struktur *breakouts* określono w oknie o długości 1 m, podczas gdy gęstość ich występowania stanowi liczba poszczególnych elementów w oknie o określonej długości (1 m), które przemieszcza się wzdłuż całego profilu otworu. Przedziały głębokościowe, w których zaobserwowano anomalne naprężenia poziome, zidentyfikowano na podstawie obecności szczelin indukowanych i struktur *breakouts*.

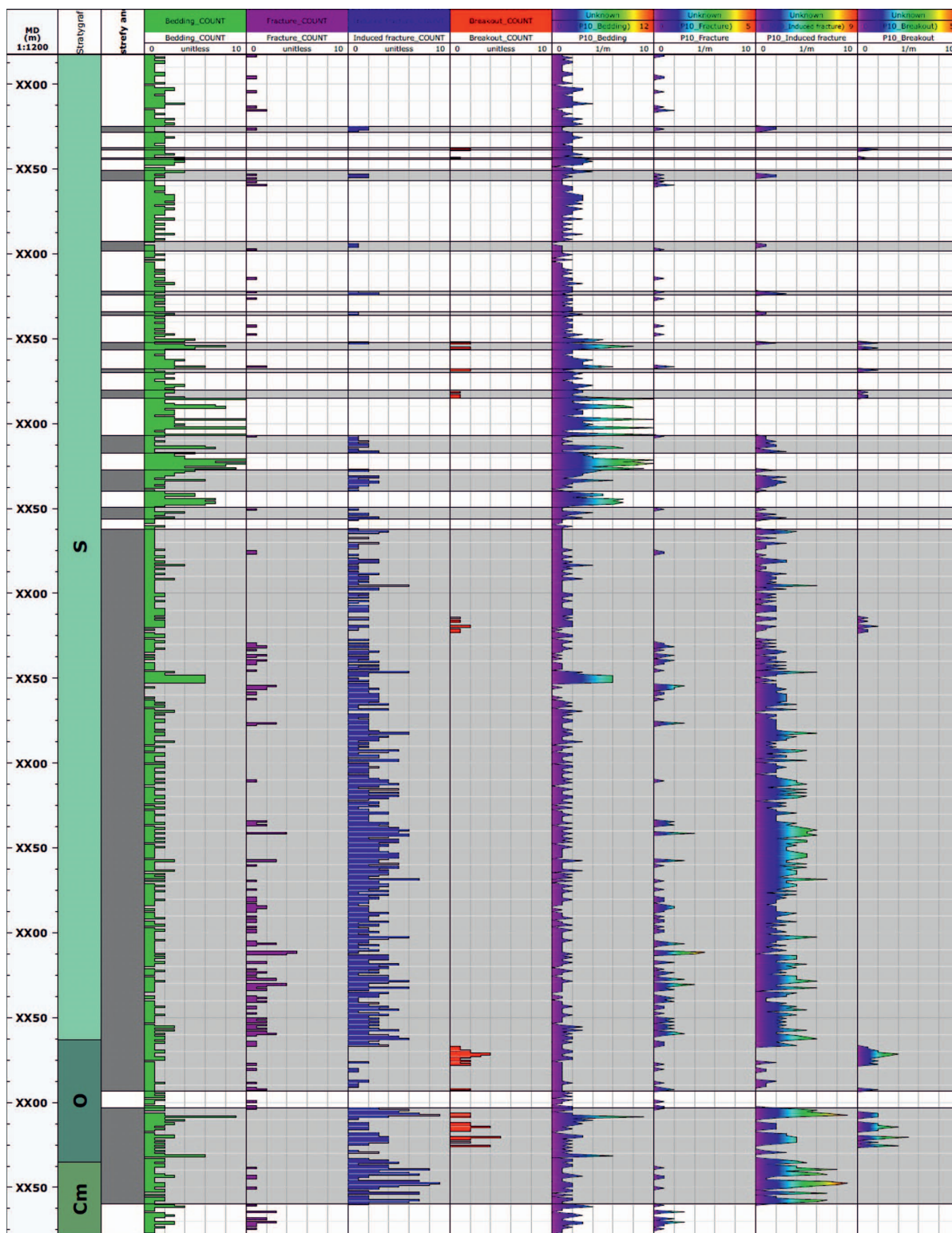
W profilu otworu A występuje znacznie więcej szczelin wzbudzonych procesami wiercenia niż struktur zniszczenia kompresyjnego *breakouts*, podczas gdy w otworze B stwierdzono dominację struktur *breakouts* nad szczelinami indukowanymi. Trend ten zaobserwowano już na etapie analizy wykresów stereograficznych. W górnej części interwału rozważanego w otworze A obecne są strefy anomalne związane z punktowo występującymi szczelinami indukowanymi czy strukturami *breakouts*. Ich miąższości nie przekraczają zazwyczaj 2 m. W przybliżeniu od połowy syluru zaobserwować można wzrost gęstości występowania szczelin wzbudzonych procesami wiercenia. Anizotropia poziomych naprężeń obejmuje interwał aż do połowy kambru, gdzie zagęszczenie szczelin indukowanych jest największe (około 9 struktur na metr). Występowanie struktur *breakouts* w otworze B wiąże się z obecnością podatnych na zniszczenie kompresyjne sylurskich skał iłowcowo-mułowcowych. Strefy anomalne oprócz zniszczonych kompresyjnie warstw sylurskich obecne są także w dolnej części ordowiku i kambrze rozważanego profilu otworu.

Podsumowanie i wnioski

W pracy zaprezentowano zasadę wykonywania pomiarów za pomocą sondy FMI-HD, schemat przetwarzania surowych danych obrazowania, a także ich późniejszą analizę. Dane pochodziły z dwóch głębokich otworów odwierconych na terenie basenu lubelskiego. Podczas procesu interpretacji elektrycznych obrazów otworowych zwrócono szczególną uwagę na identyfikację struktur zniszczenia kompresyjnego (*breakouts*) oraz tensyjnego (szczeliny indukowane) skał występujących w profilu odwiertu. Na tej podstawie określono kierunki głównych naprężeń poziomych w górotworze,

a także zidentyfikowano strefy anomalnych naprężeń wzdłuż całego interwału pomiarowego.

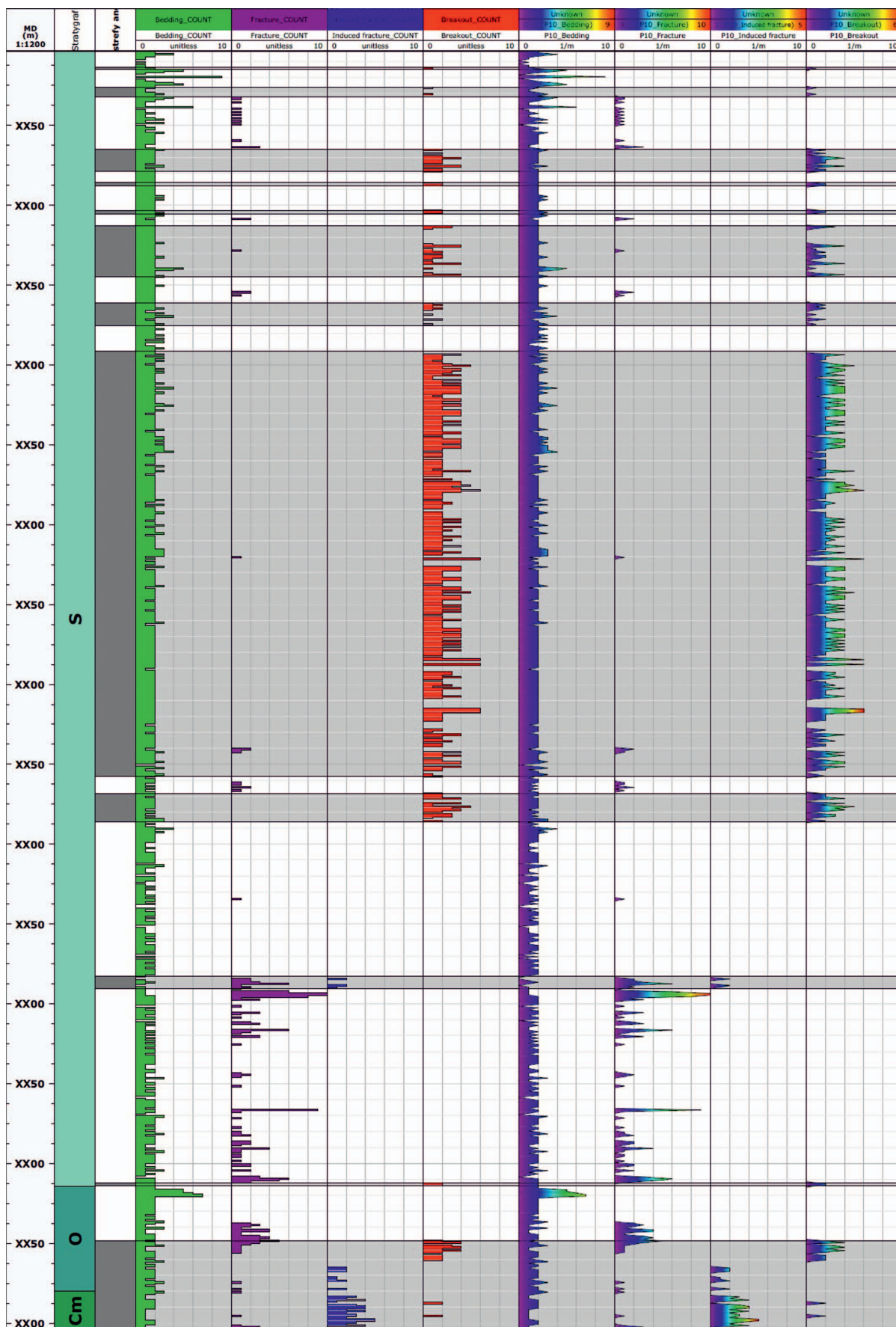
Na podstawie przedstawionych w artykule przykładów stwierdzono, że w otworze A występuje więcej szczelin indukowanych niż struktur *breakouts*, podczas gdy w otworze B zaobserwowano przewagę struktur zniszczenia kompresyjnego nad szczelinami tensyjnymi. W profilu otworu A wyinterpretowano ponadto niemal pionowe szczeliny naturalne, strefy bioturbacji oraz owalne konkrecje wapienne (nodule). Zaobserwowano także charakterystyczny obraz regionalnego



Rys. 10. Otwór A. Zestawienie liczebności warstw (kolor zielony), szczelin naturalnych (kolor fioletowy), szczelin wzbudzonych (kolor niebieski) i struktur *breakouts* (kolor czerwony), a także krzywych gęstości ich występowania w funkcji głębokości. W trzecim panelu przedstawiono potencjalne strefy anomalnych naprężeń w górotworze

korelacyjnego poziomu przewodnego skał syluru, składającego się z mułwców i pyłowców spojonych kalcytem. Z kolei w otworze B zidentyfikowano wiele struktur *breakouts* oraz stref silnego wymycia związanych z obecnością w interwale sylurskim podatnych na zniszczenia kompresyjne

skał iłowcowo-mułkowcowych. Na podstawie ilościowej interpretacji stwierdzono – zgodnie z teorią – że szczeliny indukowane oraz struktury *breakouts* występują we wzajemnie prostopadłych do siebie kierunkach na ściankach obu rozważanych otworów basenu lubelskiego. Identyfikacja wspo-



Rys. 11. Otwór B. Zestawienie liczebności warstw (kolor zielony), szczelin naturalnych (kolor fioletowy), szczelin wzbudzonych (kolor niebieski) i struktur *breakouts* (kolor czerwony), a także krzywych gęstości ich występowania w funkcji głębokości. W trzecim panelu przedstawiono potencjalne strefy anomalnych naprężeń w górotworze

mnianych obiektów umożliwiła określenie kierunków głównych naprężeń poziomych. Azymut równy 10 stopni, związany z występowaniem szczelin indukowanych, uznano za kierunek maksymalnego naprężenia głównego (S_{Hmax}). Z kolei struktury *breakouts* obecne na azymucie 100 stopni określają kierunek minimalnego naprężenia głównego (S_{Hmin}). Anizotropia poziomych naprężeń głównych wiąże się z występowaniem w profilu otworu szczelin wzbudzonych procesami wiercenia i struktur zniszczenia kompresyjnego *breakouts*.

Szeroko wykorzystywane w otworach produkcyjnych pomiary elektrycznego obrazowania ścianki otworu wiertniczego dostarczają wysokorozdzielczych danych, na podstawie których ocena właściwości geomechanicznych i budowy strukturalnej jest dużo dokładniejsza. Zrozumienie procesu przetwarzania danych elektrycznego obrazowania ścianki odwiertu oraz poprawna interpretacja obrazów otworowych pozwalają uniknąć niepożądanych pomyłek na etapie eksploatacji złóż węglowodorów.

Podziękowania. Autorzy dziękują ORLEN Upstream Sp. z o.o. za udostępnienie materiałów geologicznych i geofizyki otworowej.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2017, nr 1, s. 14–26, DOI: 10.18668/NG.2017.01.02

Artykuł nadesłano do Redakcji 4.10.2016 r. Zatwierdzono do druku 23.11.2016 r.

Artykuł powstał na podstawie materiałów przetworzonych i zinterpretowanych dla potrzeb przygotowania pracy magisterskiej inż. Tomasza Plewki na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH w 2016 r.

Literatura

- [1] Brudy M., Zoback M.D.: *Drilling-induced tensile wall-fractures: implications for determination of in-situ stress orientation and magnitude*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 1999, vol. 36, no. 2, s. 191–215.
- [2] *FMI-HD High-Definition Formation Microimager*. Schlumberger Limited, <http://www.slb.com/fmi-hd> (dostęp: sierpień 2016).
- [3] Jarosiński M.: *Badania współczesnych naprężeń skorupy ziemskiej w głębokich otworach wiertniczych w Polsce metodą analizy struktur breakouts*. Instrukcje i Metody Badań Geologicznych, z. 56. Warszawa 1999, s. 9–80.
- [4] Joubert J.-B., Millot P., Montaggioni P., Dymmock S., Andonof L., Kadri N., Torres D.: *Understanding wireline borehole image workflows from the wellsite to the end user*. First Break 2016, vol. 34, no. 3, s. 65–78.
- [5] *Model field at a point by IGRF (IGRF-12)*. <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/point/index.html> (dostęp: styczeń 2016).
- [6] Paczeńska J.: *Podsumowanie*. [W:] *Busówno IG 1*. Profile Głęb. Otw. Wiert. 2007, nr 118, s. 207–208.
- [7] Paczeńska J., Poprawa P.: *Rola procesów tektonicznych oraz eustatycznych w rozwoju sekwencji stratygraficznych utworów neoproterozoiku i kambru basenu lubelsko-podlaskiego*. Przegląd Geologiczny 2005, vol. 50, nr 7, s. 562–571.
- [8] Plewka T.: *Wyznaczenie stref anomalnego naprężenia w otworze na podstawie elektrycznego obrazowania ścianki otworu (praca magisterska)*. Biblioteka Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej, Kraków 2016.
- [9] Pöppelreiter M., García-Carballido C., Kraaijveld M. (eds.): *Dipmeter and borehole image log technology*. AAPG Memoir 92. American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma 2010, s. 1–38.
- [10] Poprawa P., Paczeńska J.: *Rozwój ryftu w późnym neoproterozoiku–wczesnym paleozoiku na lubelsko-podlaskim skłonie kratonu wschodnioeuropejskiego – analiza subsydencji i zapisu facjalnego*. Przegląd Geologiczny 2002, vol. 50, nr 1, s. 49–63.
- [11] Porębski S.J., Prugar W., Zacharski J.: *Łupki sylurskie platformy wschodnioeuropejskiej w Polsce – wybrane problemy poszukiwawcze*. Przegląd Geologiczny 2013, vol. 61, nr 8, s. 468–477.
- [12] Prugar W.: *Środowisko depozycji a rozwój procesów naftowych w utworach dolnego paleozoiku centralnej i południowej części rowu lubelskiego (rozprawa doktorska)*. Biblioteka Główna Akademii Górniczo-Hutniczej, Kraków 2013, s. 6–45.
- [13] Rider M.: *The geological interpretation of well logs*. Rider-French Consulting Ltd., Sutherland, Szkocja, 2002, s. 169–225.
- [14] Serra O., Serra L.: *Well logging data acquisition and applications*. Serralog, Méry-Corbon, Francja, 2004, s. 483–555.
- [15] Techlog Interactive Suite: Plik pomocy do programu Techlog®.
- [16] Zoback M.D.: *Reservoir Geomechanics*. Cambridge University Press, 2007.
- [17] Zoback M.D., Moos D., Mastin L., Anderson R.N.: *Well bore breakouts and in situ stress*. Journal of Geophysical Research 1985, vol. 90, no. B7, s. 5523–5530.



Mgr inż. Tomasz PLEWKA
Doktorant
Heriot-Watt University w Edynburgu
Edinburgh Campus
Edinburgh EH14 4AS
E-mail: tp15@hw.ac.uk



Prof. dr hab. inż. Jadwiga JARZYNA
Profesor zwyczajny
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica
w Krakowie
Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
E-mail: jarzyna@agh.edu.pl