

Charakterystyka dystrybucji seryjnych spękań ciosowych w mechanicznie warstwowanym kompleksie łupkowym na podstawie analizy danych otworowych z basenu bałtyckiego

Streszczenie

Geometria i parametry statystyczne sieci spękań od lat były przedmiotem badań w związku z wpływem jaki wywierają na przepuszczalność skał, migrację płynów złożowych czy też odpowiedź ośrodka na zabiegi szczelinowania hydraulicznego. Spękania ciosowe są w tym kontekście szczególnie istotne, ze względu na ich powszechne występowanie i związek ze stratygrafią kompleksu skalnego. Analitycy naftowi często ignorują spękania ciosowe w modelach basenów ze względu na ich małe rozmiary, a tym samym ignorują ich wpływ na wyzwianie zdarzeń mikrosejsmicznych i stymulację przepuszczalności. Dlatego podstawowym uzasadnieniem podjęcia badań było uwzględnienie systemu spękań ciosowych i jak najdokładniejsze jego scharakteryzowanie poprzez opracowanie i wdrożenie nowych metod analitycznych, które dostarczają bardziej wiarygodnych wartości jego parametrów statystycznych i rozkładu stratygraficznego. Opracowane metody i ich zastosowanie do danych otworowych oraz wykorzystanie wyników w analizach basenowych zostały opisane w czterech artykułach naukowych składających się na rozprawę:

1. **Bobek K.**, & M. Jarosiński, 2021. Modifications of methods for the fracture analysis from borehole data in application to shale formations. *Geological Quarterly*, 65: 23, doi: 10.7306/gq.1591
2. **Bobek K.**, & M. Jarosiński, 2018. Parallel structural interpretation of drill cores and microresistivity scanner images from gas-bearing shale (Baltic Basin, Poland). *Interpretation*, 6, 1-14, doi: 10.1190/INT-2017-0211.1
3. Olkiewicz M., **K. Bobek**, M. Jarosiński, R. Pachytel, 2021. Comparison of joint sets orientation in the Lower Paleozoic shales exposed in Scania (SW Sweden) and concealed in N Poland: a multi-methodological approach. *Geological Quarterly*, 65: 63, doi: 10.7306/gq.1632
4. M. Jarosiński, **K. Bobek**, A. Głuszyński, K. Sowizdzał, T. Słoczyński, in press. Fracture stratigraphy, stress and strain evolution in shale succession of the Lower Paleozoic Baltic Basin (Poland). *AAPG Bulletin*, doi: 10.1306/10112221140

W pierwszym w wymienionych artykułach opisano autorskie metody analizy sieci spękań na podstawie danych z otworów wiertniczych, opracowane na potrzeby analizy spękań ciosowych w formacjach łupkowych, wdrożone w postaci pakietów kodu w językach MatLab i Python. Pierwszą z wdrożonych metod jest algorytm do prezentacji orientacji spękań w postaci ważonych diagramów rozetowych z uwzględnieniem błędów pomiarowych. Standardowy sposób projekcji diagramów rozetowych zakłada traktowanie każdego spękania jako jednego rekordu, bez względu na jego rzeczywiste rozmiary. Biorąc jednak pod uwagę charakterystykę spękań ciosowych, które w większości są ograniczone powierzaniem warstw i tym samym istnieje możliwość pomierzenia ich rzeczywistej wysokości, nowy algorytm zakłada uwzględnienie tego parametru w projekcjach ich orientacji. W takim podejściu, wartości otrzymane dla poszczególnych klas kątowych wybranych przedziałów azymutalnych reprezentują sumaryczną wysokość spękań zamiast ich liczby. Ponadto, posiadając dane na temat orientacji spękań zebrane z orientowanego rdzenia, dodatkowo opracowano

algorytm rozmywania orientacji rekordów na sąsiednie klasy kątowne w zależności od szacowanej wielkości błędu pomiarowego, uwzględniając go w projekcji wraz z innymi parametrami ważącymi. Drugą metodą przedstawioną w artykule jest nowy algorytm obliczania intensywności spękań, gdzie parametr ten jest wyrażany jako sumaryczna powierzchnia spękań przypadająca na metr sześcienny skały. Podstawowym założeniem algorytmu jest obliczenie intensywności spękania w profilu otworu z wykorzystaniem zmodyfikowanej wersji średniej ruchomej. Do wyznaczenia powierzchni spękań wykorzystano pomierzoną wysokość każdego spękania mieszczącą się w danym oknie przeszukiwania pomnożoną przez oczekiwaną wartość cięciwy otworu. Uśrednioną powierzchnię spękań mieszczącą się w objętości skały zawartej w oknie przeszukiwania o danej wysokości przypisuje się następnie do głębokości odpowiadającej środkowi wybranego okna.

W drugim z przedłożonych artykułów opisano wyniki profilowania strukturalnego rdzeni z 5 otworów wiertniczych o sumarycznej długości wynoszącej 1299 m i przeprowadzonej interpretacji strukturalnej odpowiadających im mikroopornościowych obrazów ścian otworu wykonanych sondami XRMI (ang. *X-tended Range Micro Imager*) i FMI (ang. *Formation Micro-Imager*). Dla spękań pomierzonych na rdzeniu wiertniczym uwzględniano takie parametry jak: głębokość do górnego zakończenia spękania, wysokość, kąt upadu, aperturę żył mineralnych, ograniczenie warstwowaniem (brak, jednostronne lub dwustronne), mineralizację, stopień spękania i rodzaj pęknięcia (poprzez centralny szew mineralizacji lub wzdłuż granicy pomiędzy skałą a mineralizacją). Tak precyzyjne analizy strukturalne zostały zaprojektowane z myślą o wykorzystaniu ich do projektowania i interpretacji wyników testów i zabiegów szczelinowania hydraulicznego w otworach wiertniczych. Analizę spękań widocznych w obrazach elektrooporowych wykonano za pomocą programu TechLog (Schlumberger). W ramach prowadzonej interpretacji obrazu skanera zebrano następujące parametry: głębokość do górnej granicy spękania, azymut kierunku zapadania, kąt upadu oraz wysokość (rzeczywistą lub mieszczącą się w przestrzeni obserwacyjnej) wraz z oznaczeniem subiektywnej oceny jakości interpretacji. Zebrane parametry zostały następnie wykorzystane do wyznaczenia orientacji spękań oraz intensywności spękania za pomocą opracowanych algorytmów. Wyznaczone wartości intensywności spękania dla profili wybranych otworów posłużyły do wykonania analizy porównawczej wyników interpretacji spękań z rdzeni wiertniczych z interpretacjami obrazów skanerów elektrooporowych. Przeprowadzona analiza wykazała szereg rozbieżności pomiędzy uzyskanymi wynikami w obrębie tych samych interwałów głębokościowych. Pierwszym powodem wykrytych różnic jest ograniczenie spękań ciosowych przez powierzchnie warstw, co powoduje, że możliwość ich wykrycia jest zależna od dostępnej przestrzeni obserwacyjnej. Biorąc pod uwagę, że średnica pobranego rdzenia jest zwykle ponad dwukrotnie mniejsza od średnicy otworu, opracowano nową metodę predykcji, które spękania widoczne w obrazach skanera powinny być widoczne także w rdzeniu wiertniczym. Metoda polega na określeniu rozwartości kątowej zasięgu spękań wyznaczonych w obrazie skanera (tzw. kąta krytycznego), dla którego spękania nie penetrują rdzenia. Zweryfikowano skuteczność tej metody, a także wskazano na jej użyteczność w korelowaniu głębokości rdzenia wiertniczego z karotażem skanera. Inną przyczyną różnic w intensywności spękań jest kalcytowe wypełnienie żyłek, co sprawia, że są one słabo widoczne w jasnym, marglistym rdzeniu a są lepiej obrazowane przez kontrast oporności w obrazie skanera. Różnice wynikają również z występowania warstw tufitowych, które powodują niestabilność ścian otworów wiertniczych i zacierają spękania w zapisie geofizycznym oraz występowanie spękań indukowanych wierceniem imitujących spękania naturalne. W interwałach zbiornikowych, widoczność szczelin jest ograniczana przez obecność gazu ziemnego, który zwiększa rezystywność elektryczną zarówno matrycy skalnej jak i samych szczelin.

W trzecim z wymienionych artykułów przedstawiono wyniki analiz sieci spękań ciosowych wykonanych dla ośmiu otworów wiertniczych zlokalizowanych w basenie bałtyckim i zestawiono je z

wynikami pomiarów przeprowadzonych w 13 odsłonięciach na terenie południowej Szwecji (Skanii). W ramach prac terenowych wykonanych w odsłonięciach na terenie Szwecji zebrano dane na temat azymutu biegu, wysokości, spacji oraz długości spękań ciosowych widocznych w ścianach wyrobisk korzystając z kompasu geologicznego. W niedostępnych odsłonięciach wykonano fotogrametryczne pomiary spękań jak również wykorzystano analizę obrazu satelitarnego z Google Maps. Statystyczne opracowanie wyników wskazało na dużą zbieżność pomierzonych orientacji spękań ciosowych dla różnych metod pomiarowych, jak również dla obszarów północnej Polski i południowej Szwecji. Zarówno analiza danych otworowych jak i pomiary w odsłonięciach wskazały na istnienie trzech zespołów spękań ciosowych w badanych formacjach: dominujących zespołów J1 o biegu NNE i J2 o biegu WNW oraz podrzędnego zespołu J3 o biegu NW. Bieg zespołów spękań rozpoznanych w Skanii jest odchylony o około 5-10° w stosunku do zespołów wyznaczonych w otworach wiertniczych na pomorzu, co wskazuje na powstanie analizowanych spękań ciosowych w wyniku tych samych zdarzeń tektonicznych o skali basenowej oraz na stabilność kierunków oddziaływania ówczesnych naprężeń tektonicznych na dużym obszarze. Brak wyraźnego wpływu strefy Teisseyrea-Tornquista na dystrybucję głównych zespołów ciosu w Skanii przemawia za ich powstaniem przed reaktywacją tej strefy na przełomie karbonu i permu. Jest to pierwszy przegląd systemu ciosowego w kompleksie osadowym basenu bałtyckiego.

W ostatnim z przedłożonych artykułów opisano możliwość wykorzystania danych z profilowań strukturalnych w analizach ewolucji basenów naftowych. Wykonane profile intensywności spękań ciosowych oraz analiza występowania struktur takich jak żyły poziome i lustra tektoniczne wskazały na rozwarstwienie strukturalne jednostek litostratygraficznych. Przyczynami tego zjawiska są: zmienność ciśnień porowych - uwarunkowana generowaniem węglowodorów oraz zróżnicowanie mechaniczne kompleksu łupkowego. Sekwencję ewolucji strukturalnej basenu bałtyckiego wyznaczono na podstawie integracji analiz strukturalnych, mechanicznych, modelowania ewolucji basenu, etapów generowania węglowodorów i ewolucji geotektonicznej. Obejmuje ona trzy etapy naturalnego szczelinowania hydraulicznego: (1) epizod otwierania żył poziomych po maksymalnym pogrzebaniu, datowany na późny karbon, (2) epizod otwierania spękań zespołu J1 w fazie kolizji waryscyjskiej mający miejsce pod koniec karbonu i (3) epizod otwierania spękań zespołu J2 w okresie relaksacji naprężeń związanych z kolizją, na granicy karbonu i permu. Dla tych epizodów określono ewolucję reżimu naprężeń tektonicznych i obliczono zmiany ciśnienia porowego, naprężenia i odkształcenia sprężystego. Ostatecznie oceniono również udział różnych składowych zmian ciśnienia porowego i naprężeń związanych z ekshumacją badanego kompleksu łupkowego i wyodrębniono z nich czysty czynnik tektoniczny, charakterystyczny dla analizowanej części basenu.

Ogólnie, przeprowadzone badania wskazały na potrzebę modyfikacji standardowych metod analizy spękań w skałach, w których dominują spękania ciosowe ograniczone powierzchniami warstw. Proponowane modyfikacje metod analitycznych dotyczą: (1) uwzględnienia wysokości spękań ciosowych ograniczonych powierzchniami warstw w analizach intensywności spękań; (2) obliczanie diagramów biegu spękań z uwzględnieniem wagi wysokości spękań oraz apertury żył w niektórych przypadkach; (3) uwzględnienie błędu pomiaru biegu spękań w konstrukcji diagramów rozetowych; (4) konieczności kompilacji wyników interpretacji strukturalnej skanera elektrooporowego i rdzenia wiertniczego; (5) możliwości wykorzystania obu zestawów danych do skorelowania głębokości rdzenia i dziennika obrazu. W analizach złożowych istotny może być sposób pęknięcia żył mineralnych wypełniających spękania ciosowe. Zaaplikowanie nowych metod pozwoliło na podwyższenie precyzji wyznaczenia zmienności intensywności spękań. Dzięki temu, można było wskazać na rozwarstwienie seryjnych struktur tektonicznych pomiędzy jednostkami litostratygraficznymi/mechanicznymi. Pokazano jak precyzyjne analizy strukturalne można wykorzystać do interpretacji ewolucji naprężeń, odkształceń i ciśnień w analizowanych formacjach, a także do korelacji zespołów ciosowych

między odległymi fragmentami basenu sedymentacyjnego. Wdrożenie opracowanych metod analitycznych pozwoli na dokładniejsze scharakteryzowanie sieci spękań istniejących w skałach zbiornikowych i ich roli w przebiegu szczelinowania hydraulicznego oraz migracji i eksploatacji węglowodorów.