

Maria Bała

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

Wydział Geologii Geofizyki i Ochrony Środowiska

Obliczanie parametrów anizotropii Thomsena w łupkach gazonośnych basenu bałtyckiego na podstawie pomiarów geofizyki otworowej

Anizotropia oznacza zróżnicowanie, między innymi, parametrów sprężystych w zależności od kierunku, w jakim są one mierzone. Serie anizotropowe mogą tworzyć się w wyniku procesów depozycji oraz naprężeń tektonicznych ściskających i rozciągających. Przy interpretacji danych geofizyki otworowej, w zależności od skali zjawiska, anizotropię możemy rozpatrywać jako makro- lub mikroanizotropię. Makroanizotropia będzie związana z warstwowaniem formacji skalnych, np. łupki ilaste przeławiczone wkładkami piaskowca czy mułowca. Mikroanizotropia jest związana z wewnętrzną strukturą, np. frakcyjne ułożenie ziaren o różnej wielkości lub wydłużone w jednym kierunku przestrzenie porowe itp. Problemem anizotropii własności sprężystych skał i jej wpływem na rejestrowane prędkości w profilowaniach akustycznych w otworach zajmowano się na świecie od wielu lat. Teoretyczne modelowania „odpowiedzi” sond akustycznych w skałach piaskowcowo-ila-nych zakładają najczęściej uproszczone ośrodki anizotropowe. Najbardziej znane są opisane przez Thomsena [17], parametry anizotropii ε , γ i δ , charakterystyczne dla modelu z heksagonalną symetrią (ang. *transverse isotropy* – TIV). Zauważono, na podstawie badań laboratoryjnych, że parametry ε , γ przyjmują najczęściej wartości dodatnie, a parametr δ wartości zarówno dodatnie, jak i ujemne. W pracy przedstawiono próby obliczenia parametrów anizotropii własności sprężystych dla utworów ilasto-mułowcowych syluru i ordowiku w kilku otworach leżących w basenie bałtyckim. Zastosowano metodę przedstawioną w publikacji [11]. Metoda ta stworzyła możliwość określenia parametrów ε i γ w przypadku poziomo warstwowanych łupków i prostopadłych do nich otworów. Pomiary geofizyki otworowej, a w szczególności dane rejestrowane akustycznymi sondami dipolowymi umożliwiły określanie prędkości fal podłużnych P i poprzecznych S_{Fast} i S_{Slow} oraz obliczanie parametrów Thomsena ε i γ . Uzyskane rezultaty, porównane z otrzymanymi wynikami dla podobnych utworów łupków gazonośnych publikowanymi w literaturze, potwierdziły poprawność metody i podobieństwo zakresu zmienności parametrów ε , γ [vide 17, 20, 22].

Słowa kluczowe: anizotropia własności sprężystych, prędkości fal P i S, profilowania akustyczne, łupkowe formacje gazonośne, basen bałtycki, parametry Thomsena.

Thomsen anisotropy parameters calculation in the Baltic Basin shale gas formations based on the measurement of well logging data, some attempts

Anisotropy occurs in rocks and strongly affects their elastic properties. It means the differentiation of physical parameters depending on the direction in which these parameters are measured. Anisotropic series can be formed as a result of deposition processes and tectonic compressive and tensile stresses. In the interpretation of well logging data, depending on the scale of the phenomenon, anisotropy can be considered as macro- or micro-anisotropy. The macro-anisotropy will be associated with the thin-layer beds of rock formations, e.g. clay shales laminated with layers of sandstone or siltstone. The micro-anisotropy is related to the internal structure, e.g. fractional distribution of grains of different sizes or pore spaces elongated in one direction, etc. The problem of rock anisotropy and its effect on recorded velocities in acoustic log in boreholes, has been studied for many years globally. Theoretical modeling of the “response” of acoustic tools in sandstone and clay rocks usually assumes simplified anisotropic media. The best-known ones are described by Thomsen [17], anisotropy parameters ε , γ and δ characteristic for the model with hexagonal symmetry (transverse isotropy – TIV). It was noticed, on the basis of laboratory tests, that parameters ε , γ usually take positive values and parameter δ both positive and negative values. The paper presents the attempts to calculate the parameters of elastic anisotropy, for the Silurian and Ordovician clayey silty deposits in several boreholes located in the Baltic basin. The method presented in publication [11] has been applied. This method has created

the possibility to determine the parameters ε and γ for horizontally layered shales and perpendicular boreholes to them. The measurements of well logging, and in particular the data recorded with acoustic dipole probes, made it possible to determine the velocity of the longitudinal P and transverse waves of SFast and SSlow and to calculate the Thomsen ε and γ parameters. The obtained results, compared with the results for similar gas-bearing shale, published in the literature, confirmed the correctness of the method and the similarity of the variability range of ε , γ parameters. [vide 17, 20, 22].

Key words: anisotropy of elastic properties, P and S velocities, acoustic logs, shale gas formations, Baltic Basin, Thomsen parameters.

Wprowadzenie

Problemem anizotropii własności sprężystych skał i jej wpływem na rejestrowane prędkości w profilowaniach akustycznych w otworach zajmowano się na świecie od wielu lat. Przy rozważaniach tego zagadnienia wykorzystywano w szerokim zakresie badania laboratoryjne. Do ważniejszych publikacji z tego zakresu należy zaliczyć prace [5, 8–10, 13, 14, 18, 19, 21, 22] i wiele innych.

Ostatnio zagadnieniem anizotropii skał na podstawie danych z metod akustycznych i pomiarów elektrycznych w otworach zajmowała się również autorka niniejszej publikacji [2, 3].

Osobnym zagadnieniem jest ocena anizotropii na podstawie badań sejsmicznych, które nie są jednak omawiane w niniejszym artykule.

Parametry anizotropii

Teoretyczne modelowania odpowiedzi sond akustycznych w skałach piaskowcowo-ilastych zakładają najczęściej uproszczone ośrodki anizotropowe. W najprostszym przypadku anizotropii z heksagonalną symetrią, tzw. słabej anizotropii (*vertical transverse isotropy* z pionową osią symetrii – TIV lub VTI), macierz tensora sztywności ma pięć niezależnych współczynników spośród 12 niezerowych: C_{11} , C_{33} , C_{44} , C_{66} i C_{13} oraz $C_{11} = C_{22}$, $C_{12} = C_{21}$, $C_{13} = C_{31} = C_{23} = C_{32}$, $C_{44} = C_{55}$, $C_{66} = (C_{11} - C_{12})/2$.

Thomsen [17] wprowadza trzy parametry sprężystości ε , γ i δ , definiując je jako kombinację modułów sprężystości C_{ij} dla scharakteryzowania ośrodka *transverse isotropy* VTI.

$$\varepsilon = \frac{C_{11} - C_{33}}{2 \cdot C_{33}} \quad \gamma = \frac{C_{66} - C_{44}}{2 \cdot C_{44}} \quad \delta = \frac{(C_{13} + C_{44})^2 - (C_{33} - C_{44})^2}{2 \cdot C_{33} \cdot (C_{33} - C_{44})} \quad (1)$$

Parametry te decydują o kształcie frontu fal P i S w ośrodkach VTI.

Parametr ε charakteryzuje różnicę pomiędzy prędkością pionowo i poziomo propagującej fali P, γ – różnicę pomiędzy prędkością fali S rozchodzącej się poziomo i pionowo (spolaryzowanej pionowo SV lub poziomo SH). Parametry te są zwykle określane jako parametry anizotropii fali P i S. Baniak [6] podaje, że z tych trzech parametrów δ ma największy wpływ na amplitudę fali odbitej P, przy małej odległości między punktem wzbudzenia i odbioru.

W pracy [13] przedstawiono zebrane w tabelach parametry sprężystości Thomsena ε , γ i δ obliczone dla minerałów ilastych na podstawie pomierzonych składowych C_{11} , C_{33} , C_{44} , C_{66} i C_{13} . Zauważono, że wartości ε i γ są dodatnie, natomiast δ są ujemne lub mają niskie wartości dodatnie.

Wpływ zailenia na prędkości fal V_P , V_S i stosunek V_P/V_S

Własności sprężyste łupków ilastych zależą od ich składu, objętości poszczególnych frakcji, kształtów oraz orientacji ziaren. W pracy Zhu et al. [23] podano, że zależność V_P/V_S od zawartości materiału ilastego zmienia się od 1,6 przy braku zailenia aż do 2,1 dla dużej zawartości frakcji ilastej, co pociąga za sobą także wzrost współczynnika Poissona ν . Zhu et al. [23] wprowadzają pojęcie „krytycznej zawartości iłów” (około 40%), poniżej której dla mieszaniny piaskowca i iłu parametry sprężyste rosną zgodnie z obliczeniami teoretycznymi. Powyżej tej krytycznej zawartości iłów następuje gwałtowny spadek V_P i V_S ze wzrostem frakcji ilastej.

Podobne obserwacje co do krytycznej objętości iłów przedstawiono na podstawie badań laboratoryjnych [12], co nie zostało potwierdzone w innych publikacjach (np. [7, 8]). Z obliczeń wykonanych przez Bałę [1] przy użyciu teoretycznych modeli Kustera–Toksöza oraz Biota–Gassmana wynika silny wpływ materiału ilastego na prędkości fal P i S oraz moduły sprężystości i współczynnik Poissona, jednak również nie obserwuje się obecności krytycznej objętości iłów.

Wartości V_P/V_S dla różnych minerałów ilastych mogą się znacznie różnić ze względu na obserwowaną w nich anizotropię [10].

Metoda obliczania parametrów anizotropii ϵ i γ

Li [11] przedstawia metodę obliczania parametrów anizotropii własności sprężystych ϵ i γ na podstawie zarejestrowanych prędkości $V_{P(0)}$, $V_{S(0)}$ oraz objętości ilów V_{cl} , opierając się na danych laboratoryjnych publikowanych przez Thom-sena [17], Vernika i Nura [19], Johnstona i Christensena [9] oraz Vernika i Liu [18]. Na podstawie *crossplotu* opartego na tych danych określa ϵ jako:

$$\epsilon = \frac{\epsilon_{cl} \cdot V_{cl} \cdot (V_{P(0)} - V_{Pwoda})}{V_{Pkwarc} - V_{Pwoda} - a \cdot V_{cl}} \quad (2)$$

oraz parametr γ :

$$\gamma = \frac{\gamma_{cl} \cdot V_{cl} \cdot V_{S(0)}}{V_{Skwarc} - b \cdot V_{cl}} \quad (3)$$

gdzie:

- V_{cl} – objętościowa zawartość ilów,
- $V_{P(0)}$ (lub V_P), $V_{S(0)}$ (lub V_S) – prędkości fal P i S propagujących prostopadle do warstwowania,
- V_{Pwoda} – prędkość fali P przy krytycznej porowatości (40%),

- V_{Pkwarc} , V_{Skwarc} – prędkości fal P i S dla minerału kwarcu (lub czystego piaskowca),
- ϵ_{cl} , γ_{cl} – parametry anizotropii dla ilu (wartości maksymalne).

Na wykresie $V_{P(0)}$ versus parametr anizotropii ϵ Li [11] za-nacza trzy punkty odpowiadające: 1) krytycznej porowato-ści (woda), 2) punktowi kwarcu (lub czystego piaskowca), 3) punktowi ilu. Podobnie postępuje z wykresem dla parametru γ .

W punkcie krytycznej porowatości (dla porowatości $\Phi = 40\%$) wartość prędkości fali S jest równa zero, a prę-dkość fali P może być aproksymowana prędkością w wodzie. Prędkości fal dla kwarcu (lub czystego piaskowca) odpowia-dają zerowej porowatości ($\Phi = 0\%$). Oba punkty mają też ze-rową anizotropię. Ostatni punkt dla ilu charakteryzuje się naj-wyższą wartością parametrów anizotropii.

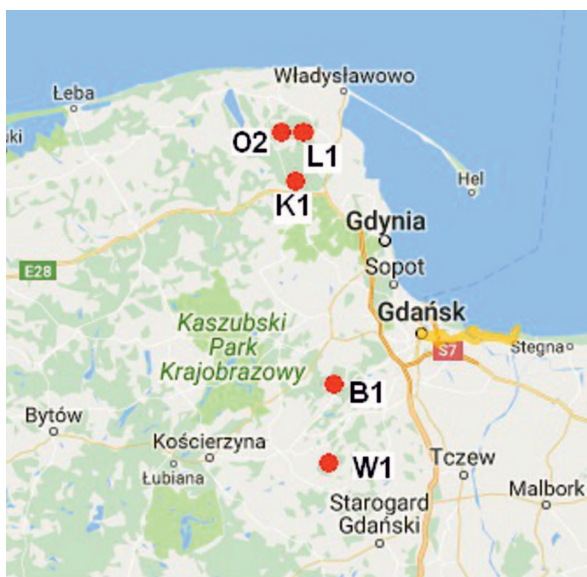
Współczynniki a i b w równaniach (2) i (3) można określić z nachylenia dowolnej linii określającej zailenie.

Na podstawie wykresu krzyżowego opartego na tych pomia-rach Li [11] sugeruje, że ϵ i γ są w przybliżeniu porównywalne.

Obliczanie parametrów sprężystości w łupkach gazonośnych

Zastosowano tę metodę [11] do utworów ilasto-mułowco-wych syluru i ordowiku w kilku otworach basenu bałtyckie-go. Otwory te były wiercone pionowo, a nawiercone struktu-ry zalegają prawie poziomo ($0 \div 5^\circ$). Można więc przyjąć, że ośrodek jest typu *vertical transverse isotropy* (VTI).

Na rysunku 1 przedstawiono orientacyjne położenie otwo-rów K-1, O-2, L-1, B-1 i W-1, w których zostały wykonane obliczenia parametrów anizotropii ϵ i γ .

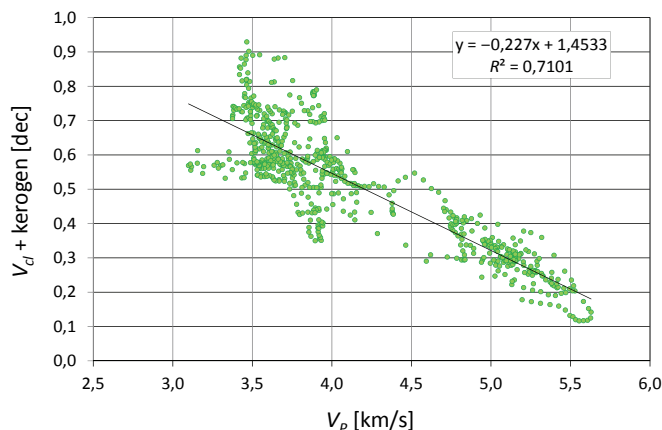


Rys. 1. Lokalizacja otworów (<http://www.mapa-polski.org/kujawsko-pomorskie,rw.html>)

Parametry sprężystości określono, wykorzystując pomia-ry sondami Compact Cross Dipole (firmy Weatherford) lub Cross Dipole Wave Sonic Tool (WSTT) firmy Halliburton czy też Dipole Shear Sonic Imager (DSI) firmy Schlumberger.

Analizując wyniki pomiarów, zauważono silną zależność pomiędzy prędkością fali podłużnej (V_p) i objętością materia-łu ilastego z uwzględnieniem obecności kerogenu ($V_{cl+kerogen}$) (rysunek 2). Współczynnik determinacji wynosi $R^2 = 0,71$.

Przed przystąpieniem do obliczeń przeanalizowano do-stępne dane laboratoryjne pod kątem składu mineralnego



Rys. 2. Wykres zależności V_p vs suma objętości frakcji ilastej i kerogenu ($V_{cl+kerogen}$) w interwale 2867÷2935 m w otworze O-2 (formacja z Pasłęka, ogniwo z Jantaru, formacja z Prabut, formacja z Sasina i wapienie z Kopalina)

poziomów syluru i ordowiku na podstawie informacji zawartych w dokumentacjach otworów. Dominującymi minerałami w badanych otworach, w próbkach pobranych z osadów syluru, były minerały ilaste, głównie illit (z reguły >55%) oraz kwarc (średnio 20%). Próbki zawierały również plagioklasy, skalenie potasowe i siarczki żelaza.

W celu określenia parametrów anizotropii Thomsena ε , γ zastosowano omówioną metodę przedstawioną przez Li [11].

Przy obliczeniach parametrów ε i γ w otworach basenu bałtyckiego przyjęto nieco inne wartości prędkości dla punktów ilu, krytycznej porowatości i kwarcu niż w publikacji [11]. Dane te określono na podstawie szczegółowej analizy krzywych geofizyki otworowej. Ustalono, że „punkt ilów” powinien zawierać sumę materiału ilastego i kerogenu. Wartości stałe na wykresie krzyżowym ustalono następująco:

$V_{Pwoda} = 1,54$ km/s; $V_{Pkwarc} = 5,98$ km/s i $V_{Skwarc} = 4,03$ km/s;
 $V_{Pkwarc}/V_{Skwarc} = 1,484$; $V_{Pcl+kerogen} = 3,5$ km/s; $V_{Scl+kerogen} = 1,78$ km/s
 oraz $V_{Pcl+kerogen}/V_{Scl+kerogen} = 1,97$.

Na rysunku 3a przedstawiono wyniki obliczonego parametru anizotropii ε w funkcji V_P oraz zailenia $V_{cl+kerogen}$ w interwale występowania utworów syluru i ordowiku w otworze O-2. Stałe punkty: punkt krytycznej porowatości (woda), punkt kwarcu (piaskowca) i punkt Cl + kerogen wytyczają trójkąt w układzie współrzędnych ε vs V_P . Analogicznie przedstawia się *crossplot* γ w funkcji V_{SFast} (rysunek 3b).

Analiza rozkładu punktów na wykresach (rysunki 3a, 3b) pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

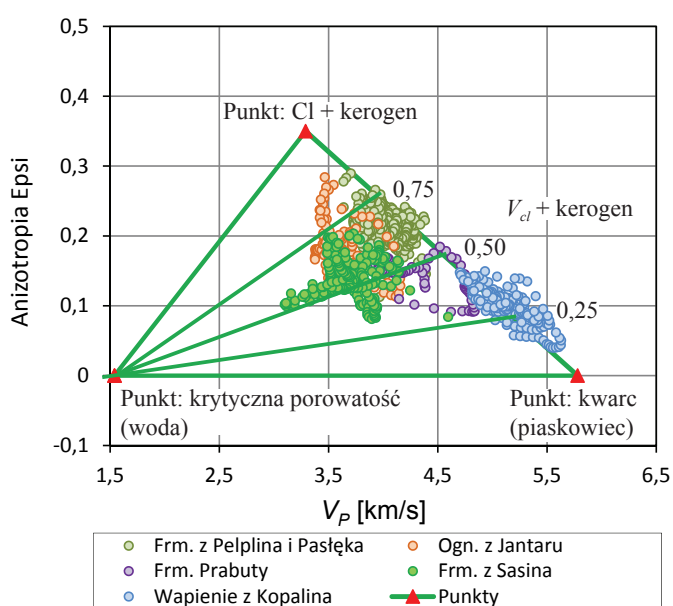
1. Prawie wszystkie punkty położone są w pobliżu linii łączącej punkt: kwarc – punkt: Cl + kerogen. Może to świadczyć o niskiej porowatości tych utworów. Wniosek ten potwier-

dzają zestawienia parametru ε ze współczynnikiem porowatości zaprezentowane dla dwóch otworów O-2 i K-1. Porowatości obserwowane w analizowanych otworach wahały się między 0,002 a 0,092 (rysunek 4).

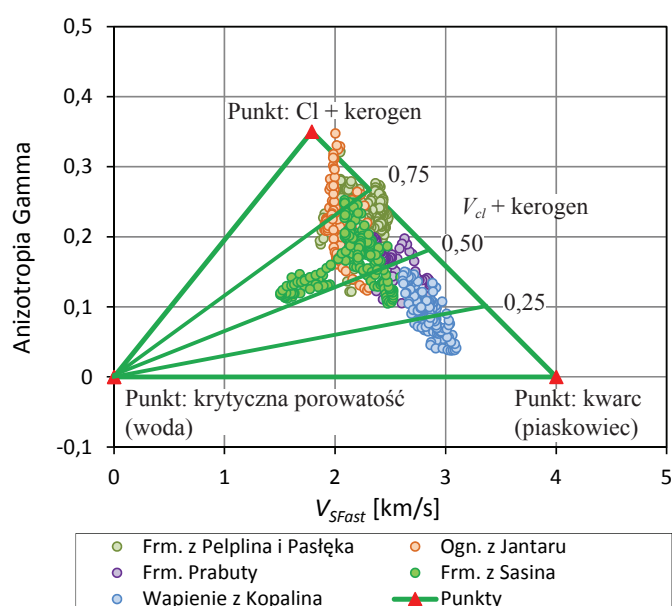
2. Przesunięcie niektórych punktów w prawo od linii punkt: kwarc – punkt: Cl + kerogen spowodowane jest domieszkami węglanów, głównie kalcytu (w utworach ilastych formacji z Sasina w próbkach stwierdzono podwyższone ilości kalcytu i obecność ankerytu). Jako że prędkość V_P minerału kalcytu przyjmuje się równą 6,22 km/s, a $V_S = 3,44$ km/s [15], uzasadnia to wysunięcie punktów na rysunku 3a przy relacji ε vs V_P i braku lub nieznacznej ilości przesuniętych punktów na rysunku 3b dla relacji γ vs V_{SFast} .

W tabelicy 1 zaprezentowano średnie wartości parametrów anizotropii ε i γ obliczonych dla formacji z Pelplina, Pasłęka, ogniwa łupków bitumicznych z Jantaru, formacji ilasto-marglistej z Prabuty, formacji łupków z Sasina oraz wapieni z Kopalina z analizowanych otworów.

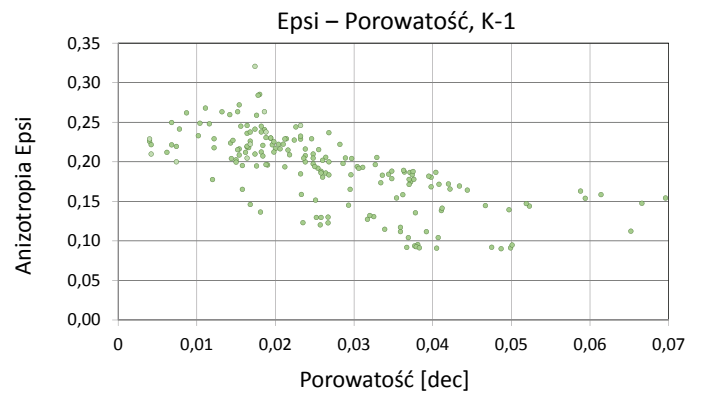
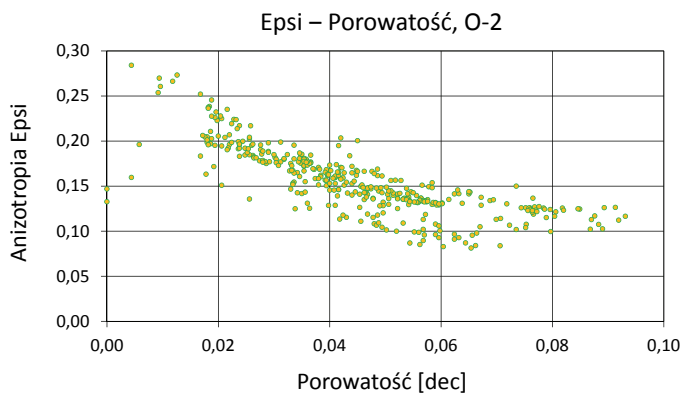
Analizując wyniki parametrów anizotropii zawarte w tabelicy 1, można zauważyć, że seria określana jako *sweet spots*, czyli sylurskie ogniwo łupków bitumicznych z Jantaru, charakteryzuje się podwyższonymi wartościami ε i γ . Formacja z Sasina, zaliczana również do *sweet spots*, jest bardziej zmienna, a uśrednione wartości ε wahały się pomiędzy 0,144 i 0,191, natomiast γ zawiera się między 0,168 a 0,194. Najniższymi wartościami ε i γ charakteryzuje się formacja wapieni z Kopalina zawierająca wapienie margliste, wapienie organodetrytyczne z cienkimi wkładkami i przerostami ilowców i ilowców marglistych ($\varepsilon = 0,062 \div 0,091$, $\gamma = 0,065 \div 0,072$).



Rys. 3a. Relacja między parametrem anizotropii ε oraz prędkością fali P (V_P) i objętością sumy zailenia i kerogenu ($V_{cl+kerogen}$) obliczone dla utworów ilasto-marglistych syluru i ordowiku w otworze O-2



Rys. 3b. Relacja między parametrem anizotropii γ oraz prędkością fali S (V_{SFast}) i objętością sumy zailenia i kerogenu ($V_{cl+kerogen}$) obliczone dla utworów ilasto-marglistych syluru i ordowiku w otworze O-2



Rys. 4. Zależność parametru anizotropii ϵ w funkcji porowatości (Φ) dla formacji ilastych syluru i ordowiku w otworze O-2 (z lewej) i K-1 (z prawej)

Tablica 1. Średnie wartości parametrów anizotropii ϵ i γ obliczonych dla formacji ilastych syluru i ordowiku z pięciu analizowanych otworów basenu bałtyckiego

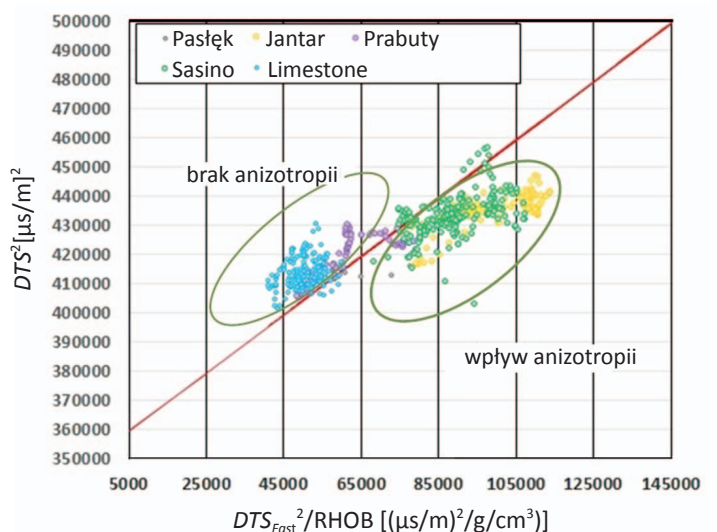
Otwory	Formacje	Parametr EPSI	Parametr GAMMA
L-1	Frm. z Pelplina	0,129	0,137
	Frm. z Pasłęka	0,196	0,198
	Ogn. z Jantaru	0,218	0,214
	Frm. z Prabut	0,142	0,161
	Frm. z Sasina	0,171	0,168
	Wapienie z Kopalina	0,062	0,071
O-2	Frm. z Pelplina	0,192	0,215
	Frm. z Pasłęka	0,201	0,210
	Ogn. z Jantaru	0,185	0,222
	Frm. z Prabut	0,142	0,159
	Frm. z Sasina	0,165	0,178
	Wapienie z Kopalina	0,091	0,069
K-1	Frm. z Pelplina	0,210	0,204
	Frm. z Pasłęka	0,250	0,239
	Ogn. z Jantaru	0,237	0,242
	Frm. z Prabut	0,160	0,153
	Frm. z Sasina	0,191	0,194
	Wapienie z Kopalina	0,075	0,069
B-1	Frm. z Pelplina	0,182	0,206
	Frm. z Pasłęka	0,197	0,220
	Ogn. z Jantaru	0,168	0,184
	Frm. z Prabut	0,135	0,154
	Frm. z Sasina	0,165	0,168
	Wapienie z Kopalina	0,081	0,065
W-1	Frm. z Pelplina	0,214	0,231
	Frm. z Pasłęka	0,231	0,240
	Ogn. z Jantaru	0,171	0,200
	Frm. z Prabut	0,153	0,172
	Frm. z Sasina	0,144	0,170
	Wapienie z Kopalina	0,075	0,072

Strefy anizotropowe a fala Stoneleya

Fala Stoneleya rejestrowana na obrazach falowych reaguje inaczej na obecność stref anizotropowych i niewykazujących anizotropii, ale o zróżnicowanych przepuszczalnościach.

Anizotropia utworów obniża czasy interwałowe tej fali (DST), podczas gdy przepuszczalność je podwyższa.

Wykres krzyżowy utworzony na podstawie wartości czasów interwałowych fali Stoneleya i czasów interwałowych fali S (DTS_{Fast}) pozwala na wykrycie zachodzących zjawisk w badanych formacjach [4, 16]. Na rysunku 5 zestawiono czasy interwałowe obu fal dla utworów syluru i ordowiku, określone na podstawie rejestrowanych obrazów falowych w otworze L1. Linia (czerwona) rozdziela skały, w których zaznacza się anizotropia od utworów niewykazujących anizotropii.



Rys. 5. Zestawienie czasów interwałowych fali S_{Fast} i fali Stoneleya w otworze L1. Linia zerowa (czerwona) rozdziela skały z anizotropią własności sprężystych od utworów niewykazujących anizotropii

Podsumowanie

Zastosowana metoda [11] stanowi próbę oceny parametrów charakteryzujących anizotropię własności sprężystych w utworach ilasto-mułowcowych syluru i ordowiku, w kilku otworach leżących w basenie bałtyckim. Pomiarów geofizyki otworowej, a w szczególności dane rejestrowane akustycznymi sondami dipolowymi, umożliwiły określanie prędko-

ści fal podłużnych P i poprzecznych S_{Fast} i S_{Slow} oraz obliczanie parametrów Thomsena ε i γ . Uzyskane rezultaty, porównane z wynikami dla podobnych utworów łupków gazonośnych publikowanymi w literaturze, potwierdziły poprawność metody i podobieństwo zakresu zmienności parametrów ε , γ [vide 17, 20, 22].

Podziękowania

Autorka dziękuje PGNiG S.A. za udostępnienie danych w ramach projektu *Blue Gas* w zadaniu 10, w którym uczestniczyła w latach 2013–2016.

Prosimy cytować jako: *Nafta-Gaz* 2018, nr 11, s. 796–801, DOI: 10.18668/NG.2018.11.03

Artykuł nadesłano do Redakcji 11.10.2018 r. Zatwierdzono do druku 5.12.2018 r.

Artykuł został opracowany na podstawie referatu wygłoszonego na Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej GEOPETROL 2018 pt. *Rozwój technik poszukiwania i eksploatacji złóż węglowodorów*. Zakopane-Kościelisko, 17–20.09.2018 r.

Literatura

- [1] Bała M.: *Effects of shale content, porosity and water- and gas-saturation in pores on elastic parameters of reservoir rocks based on theoretical models of porous media and well-logging data*. Przegląd Geologiczny 2007, vol. 55, nr 1, s. 46–53.
- [2] Bała M.: *Evaluation of Electric Parameters of Anisotropic Sandy-Shaly Miocene Formations on the Basis of Resistivity Logs*. Acta Geophysica 2011, vol. 59, nr 5, s. 954–966, DOI: 10.2478/s11600-011-0033-1.
- [3] Bała M.: *Study of the effect of anisotropy and shaliness on velocities of longitudinal and shear waves and other elastic parameters of clastic rocks*. Geologia 2009, t. 35, z. 2/1, s. 559–566.
- [4] Bała M., Jarzyna J.: *Opracowanie metodyki określania współczynnika przepuszczalności na podstawie czasów interwałowych fali Stoneley'a i fali poprzecznej*. Nafta-Gaz 2004, nr 2, s. 97–103.
- [5] Bandyopadhyay K.: *Seismic anisotropy: Geological causes and its implications to reservoir geophysics*. Ph.D. thesis, Stanford University 2009.
- [6] Banik N.C.: *An effective anisotropy parameter in transversely isotropic media*. Geophysics 1987, vol. 52, nr 12, s. 1654–1664.
- [7] Castagna J.P., Batzle M.E., Eastwood R.L.: *Relationship between the compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks*. Geophysics 1985, vol. 50, nr 4, s. 571–581.
- [8] Han D.H., Nur A., Morgan D.: *Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones*. Geophysics 1986, vol. 51, nr 11, s. 2093–2107.
- [9] Johnston J.E., Christensen N.I.: *Seismic anisotropy of shales*. J. Geophys. Res. 1995, vol. 100, no. B4, s. 5991–6003, DOI: 10.1029/95JB00031.
- [10] Katahara K.W.: *Clay mineral elastic properties*. 66th Ann. Int. Mtg., Society Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts 1996, s. 1691–1694.
- [11] Li Y.: *An empirical method for estimation of anisotropic parameters in clastic rocks*. The Leading Edge 2006, vol. 25, nr 6, s. 706–711.
- [12] Marion D., Nur A., Han D.H.: *Compressional velocity and porosity in sand-clay mixtures*. Geophysics 1992, vol. 52, nr 4, s. 554–563.
- [13] Sayers C.M.: *Seismic anisotropy of shales*. Geophysical Prospecting 2005, vol. 53, nr 5, s. 667–676.
- [14] Sayers C.M.: *The effect of kerogen on the elastic anisotropy of organic-rich shales*. Geophysics 2013, vol. 78, nr 2, s. D65–D74, DOI: 10.1190/geo2012-0309.1.
- [15] Schlumberger: *Log Interpretation Charts*. Schlumberger Educational Services, 1991.
- [16] Tang X.M., Patterson D.: *Estimating Formation Permeability and Anisotropy from Borehole Stoneley Waves*. SPWLA 45th Annual Logging Symposium 2004, s. 1–14.
- [17] Thomsen L.: *Weak elastic anisotropy*. Geophysics 1986, vol. 51, nr 10, s. 1954–1966, DOI: 10.1190/1.1442051.
- [18] Vernik L., Liu X.: *Velocity anisotropy in shales: A petrophysical study*. Geophysics 1997, vol. 62, nr 2, s. 521–532.
- [19] Vernik L., Nur A.: *Ultrasonic velocity and anisotropy of hydrocarbon source rocks*. Geophysics 1992, vol. 57, nr 5, s. 727–735, DOI:10.1190/1.1443286.
- [20] Wang Z.: *Seismic anisotropy in sedimentary rocks. Part 2: Laboratory data*. Geophysics 2002, vol. 67, nr 5, s. 1423–1440, DOI: 10.1190/1.1512743.
- [21] Wang Z., Wang H., Cates M.E.: *Effective elastic properties of solid clays*. Geophysics 2001, vol. 66, nr 2, s. 428–440.
- [22] Zalewska J., Sikora G., Gašior I.: *Laboratory studies of anisotropy elastic properties of rocks*. Nafta-Gaz 2009, nr 9, s. 669–677.
- [23] Zhu F., Gibson R.L., Estil R.: *A Critical Clay Content Model of Sand-Shale Mixtures from Log Data in the Gulf of Thailand*. SEG Expanded Abstracts 2001, s. 1720–1723.



Prof. dr hab. inż. Maria BAŁA
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Geofizyki
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
E-mail: bala@geol.agh.edu.pl