

Czy anizotropia elektryczna może być wywołana zmianami nasycenia wodą i gazem w mikro- i makroporach skał miocenu?

Maria Bała¹



Can electric anisotropy be caused by variations of water and gas saturation in micro- and macropores of Miocene rocks? *Prz. Geol.*, 61: 523–531.

A b s t r a c t. The paper presents the problem of evaluation of variation in the electrical anisotropy coefficient for sandstone-shaly Miocene deposits depending on water and gas saturation of the pore space.

A rock model built of alternating layers with varying micro- and macroporosity is discussed. This may correspond to a rock formation composed of parallel thin layers of sandstones or mudstones and claystones, which are dominated by macro- and micropores, and are characterized by different grain size or grain sorting.

The anisotropy coefficient is then affected by changes in electrical resistivity in individual layers that are a result of changes in saturation.

Keywords: *electrical anisotropy, horizontal resistivity, vertical resistivity, water saturation, hydrocarbon saturation, microporosity, macroporosity, Miocene*

Problemem anizotropii skał i jej wpływem na oporność mierzona sondami elektrycznymi w otworach zajmowano się na świecie od wielu lat. Pierwsze tego typu prace ogłosili m.in. Kunz i Moran (1958), Zajkowskij i in. (1965), Dachnow (1967), Chemali i in. (1987), Klein (1993), Bittar i Rodney (1994), Zhao i in. (1994), a później Hagiwara (1996), Klein i in. (1997), Anderson i in. (2002, 2008), Faivre i in. (2002), Tabanou i in. (2002), Rosthal i in. (2003) i wielu innych. Ostatnio zagadnienie anizotropii podjęła również autorka artykułu, zajmując się oceną elektrycznych własności piaskowcowo-ilastych skał anizotropowych na podstawie analizy profilowań oporności rejestrowanych sondami sterowanymi i indukcyjnymi w otworach (Bała, 2010, 2011).

Przyczyn anizotropii własności elektrycznych w ośrodku może być wiele, ale do najważniejszych należy zaliczyć naprzemienne ułożenie warstw piaskowcowych o małych miąższościach i łupków ilastych wykazujących wyraźną laminację. Anizotropia w skali mikroskopowej jest wywołana przez wewnętrzne uporządkowanie ziaren o różnej wielkości i wydłużonych w jednym kierunku lub przez różnicowanie rozmiarów porów itp.

W pracy ograniczono się do anizotropii powstającej w wyniku procesów sedymentacyjnych, bowiem w obrębie utworów miocenijskich przedgórza Karpat rozróżniamy niejednorodności związane głównie z takimi strukturami, czyli z warstwowaniem płasko-równoległym czy też z mikro laminacją, a nawet z wewnętrznym smugowaniem. Struktury te tworzą naprzemianległe kilkunasto-, kilkudziesięciocentymetrowe warstewki piaskowca, mułowca i iłowca. Utwory takie wykazują duże zróżnicowanie własności elektrycznych, a ze względu na niewielkie miąższości mogą wpływać na wyniki interpretacji, co jest szczególnie istotne przy określaniu nasycenia wodą i węglowodorami (Bała, 2009).

KRÓTKA CHARAKTERYSTYKA GEOLOGICZNA REJONU BADAŃ

Próbe określenia parametrów anizotropii elektrycznej – oporności wzdłuż warstwowania (R_H) i prostopadłej do

niego (R_V) – przeprowadzono w utworach miocenu autochtonicznego, w skałach piaskowcowo-ilastych. Wybrano otwór Jasionka-4, ze względu na szeroki zakres wykonanych w nim pomiarów geofizyki otworowej oraz badania laboratoryjne przeprowadzone na rdzeniach pobranych z tego otworu, których wyniki opublikowano i przedstawiono na Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej GEOPETROL 2004.

Otwór Jasionka-4 (J-4) jest usytuowany w strukturze złoża gazu ziemnego znajdującego się w centralnej części zapadliska przedkarpackiego na zachód od ciągu złóż Paliówka–Stobierna–Terliczka.

Na podstawie badań sejsmicznych, prac geofizyki otworowej i geologicznych w budowie geologicznej w rejonie złoża wyróżnia się dwa zasadnicze elementy:

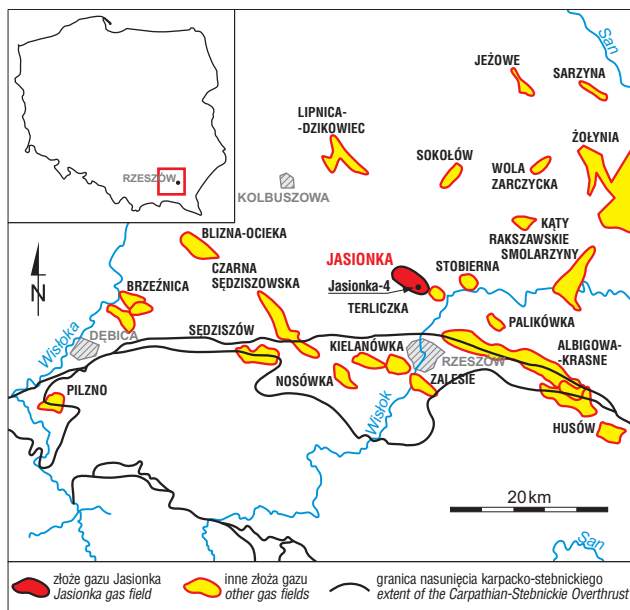
- podłoże podmiocenijskie – zbudowane ze skał prekambryjskich, głównie sphyllityzowanych łupków;
- utwory miocenu autochtonicznego – reprezentowane przez utwory badenu górnego i sarmatu, przykryte osadami czwartorzędu.

Sarmat w omawianym złożu jest wykształcony w facji ilasto-piaszczystej. Jest to seria skał ilastych, mułowcowych i piaskowcowych występująca w postaci łupków i iłupków, deltowych osadów piaszczystych, porowatych, drobno- i średnioziarnistych, oraz mułowców, często z detrytusem roślinnym (Myśliwiec i in., 2004). Na rycinie 1 przedstawiono położenie struktury gazonośnej Jasionka na tle innych złóż zapadliska przedkarpackiego w rejonie Rzeszowa, Dębicy i Kolbuszowej.

Utwory piaskowcowo-ilaste sarmatu charakteryzują się bardzo zmienną miąższością; najcieńsze z nich mają kilkadziesiąt centymetrów.

Oporność (pozorna) mierzona sondami standardowymi: podwójnym laterologiem (*dual laterolog*), indukcyjnymi o wysokiej rozdzielczości pionowej (*high resolution induction log*) czy też mikrosondami (np. *micro spherically focused log*), waha się od $0,5 \Omega \cdot m$ w horyzontach wodonośnych do $10 \Omega \cdot m$ (maksymalnie $12 \Omega \cdot m$) w warstwach nasyconych gazem.

¹ Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; bala@geol.agh.edu.pl.



Ryc. 1. Lokalizacja struktur gazonośnych w rejonie Rzeszowa, Dębicy i Kolbuszowej (Myśliwiec i in., 2004, zmienione)

Fig. 1. Location map of gas fields in Rzeszów, Dębica and Kolbuszowa region (Myśliwiec et al., 2004, modified)

Na rycinie 2 zestawiono fragment wyinterpretowanego profilu litologicznego i porowatości (ścieżka 1) oraz nasycenia wodą swobodną i związaną, a także węglowodorami ruchomymi i reszkowymi (ścieżka 2). Na ścieżkach 3 i 4 przedstawiono krzywe oporności pozornej pomierzone różnymi sondami. Wybrane krzywe z zestawu indukcyjnego o wysokiej rozdzielczości pionowej (HO09 i HO12) wraz z pomiarami podwójnym laterologiem (LLS i LLD) i mikrosondą (MSFL) zamieszczone na ścieżce 3 oraz profilowania wykonane sondami potencjałowymi (krótką – E16N, długą – E64N) i sondą sterowaną trójelektrodową (LL3) (ścieżka 4) wskazują na bardzo niskie wartości oporności pozornej. W strefach występowania gazu oporność jest nieco wyższa i sięga do $10 \Omega \cdot m$, a w wodonośnych obniża się do ok. $0,5 \Omega \cdot m$. Wahania na poszczególnych krzywych są spowodowane różnym zasięgiem radialnym zastosowanych sond. Sondy, które mają mały zasięg radialny, penetrują najczęściej strefę przemytą filtrem płuczki o wyższej oporności niż woda złożowa, a sondy o dużym zasięgu badają warstwę niezmienną.

Wyraźne rozejście się krzywych LL3, E16N i E64N (LL3 < E16N < E64N) w interwale głębokościowym 990–1015 m, zaznaczone na rycinie 2 kolorem różowym, wskazuje na obecność gazu.

MODELOWANIE WPLYWU ZMIENNYCH NASYCEŃ NA OPORNOŚĆ WZDŁUŻNĄ (R_H) I PROSTOPADŁĄ DO WARSTWOWANIA (R_V)

W pracy Kleina i in. (1997) przedstawiono sposób obliczania parametrów anizotropii elektrycznej w funkcji nasycenia wodą i węglowodorami w formacjach utworzonych z naprzemiennie występujących warstw o zmieniającej się mikro- i makroporowatości. Może to odpowiadać utworom złożonym z równoległych przewarstwień piaskowcowo-mułowcowo-iłastych zdominowanych przez makro- i mikro-pory, charakteryzujących się zróżnicowanym rozmiarem uziarnienia lub specyficznym ułożeniem ziaren. Anizotro-

pia jest wtedy wywołana zmianami elektrycznej oporności właściwej w poszczególnych warstwach będącymi wynikiem zmian nasycenia wodą lub węglowodorami.

W przypadku pionowych otworów i ośrodków anizotropowych warstwowanych poziomo dwa podstawowe wzory opisują oporności rejestrowane prostopadłe do uwarstwienia i wzdłuż niego:

$$R_V = V_{\text{sand}} \cdot R_{\text{sand}} + V_{\text{sh}} \cdot R_{\text{sh}} \quad (1)$$

$$R_H = \frac{R_{\text{sand}} \cdot R_{\text{sh}}}{V_{\text{sand}} \cdot R_{\text{sh}} + V_{\text{sh}} \cdot R_{\text{sand}}}$$

przy czym

$$V_{\text{sand}} + V_{\text{sh}} = 1$$

gdzie:

$R_{\text{sand}}, R_{\text{sh}}$ – oporności właściwe przewarstwień piaskowca i iłowca [$\Omega \cdot m$],

$V_{\text{sand}}, V_{\text{sh}}$ – objętości przewarstwień piaskowca i iłowca [–].

Wzory te wynikają z koncepcji połączeń szeregowych i równoległych „warstewek” o różnej oporności (prawa Kirchhoffa). Należy wspomnieć, że ility mogą charakteryzować się dodatkowo wewnętrzną anizotropią (np. Bała, 2011).

Załóżmy, że w ośrodku „sand” dominują makropory, a w ośrodku „sh” – mikropory. Współczynnik anizotropii określa się wtedy ze wzoru:

$$\lambda = \sqrt{R_V / R_H} \quad (2)$$

Wpływ nasycenia w ośrodkach o różnym rozkładzie porów w pierwszym przybliżeniu można modelować, stosując proste równania Archie’go:

$$S_w^n = \frac{a \cdot R_w}{\Phi^m \cdot R_t} \quad \text{czyli} \quad R_t = \frac{a \cdot R_w}{\Phi^m \cdot S_w^n} \quad (3)$$

gdzie:

S_w – nasycenie porów wodą złożową o oporności właściwej R_w [$\Omega \cdot m$];

R_t – oporność właściwa ośrodka o porowatości Φ [$\Omega \cdot m$];

a – współczynnik odsortowania ziaren (najczęściej $a = 1$), [–];

m – współczynnik cementacji [–];

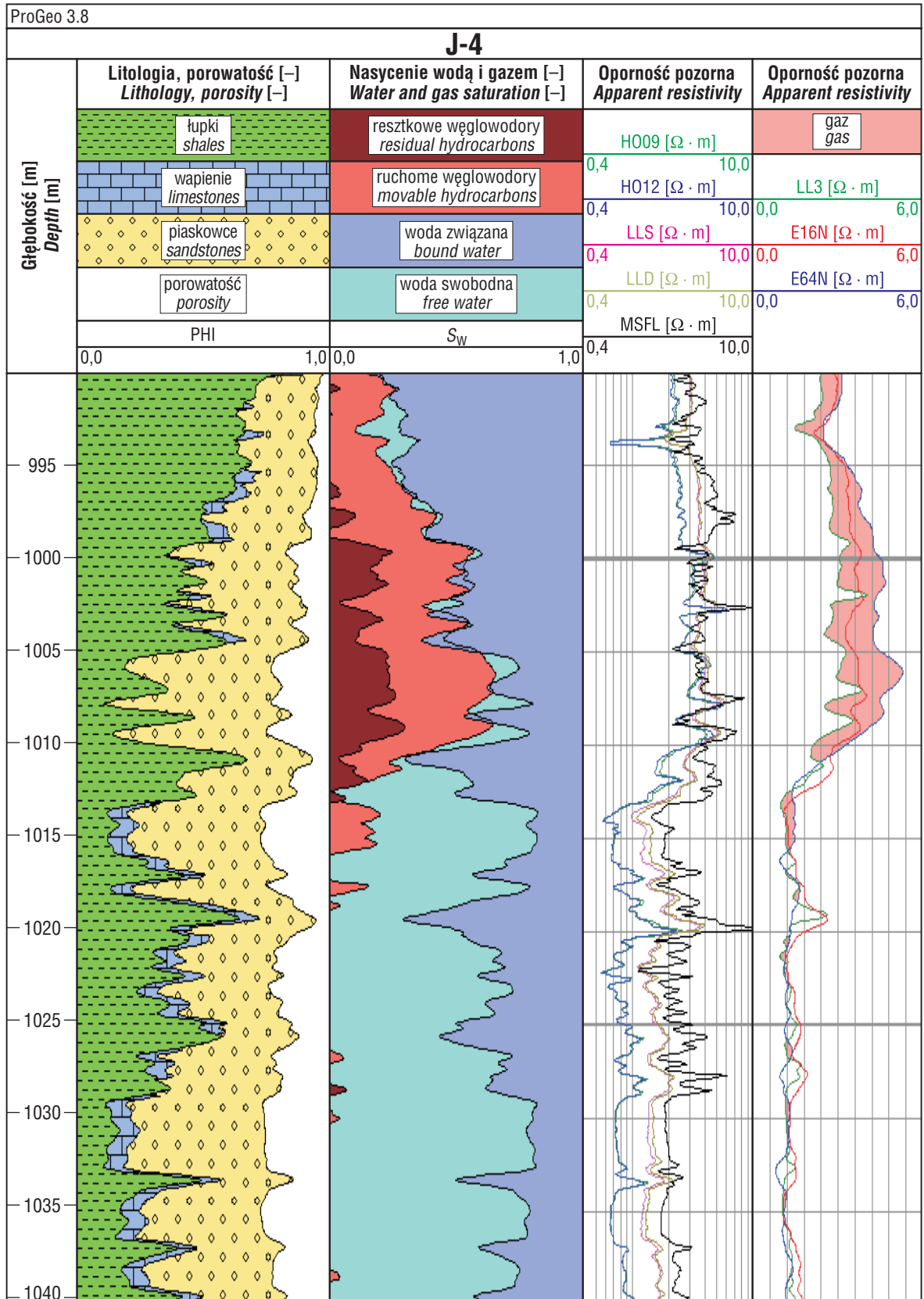
n – wskaźnik zwilżalności skał [–].

Po podstawieniu równań (3) do równań (1) uzyskamy wzory na R_V i R_H :

$$R_V = V_{\text{sand}} \left[\frac{a_{\text{sand}} \cdot R_{W_{\text{sand}}}}{\Phi_{\text{msand}}^m \cdot S_{W_{\text{sand}}}^n} \right] + V_{\text{sh}} \left[\frac{a_{\text{sh}} \cdot R_{W_{\text{sh}}}}{\Phi_{\text{msh}}^m \cdot S_{W_{\text{sh}}}^n} \right] \quad (4)$$

$$\frac{1}{R_H} = \frac{V_{\text{sand}}}{\left[\frac{a_{\text{sand}} \cdot R_{W_{\text{sand}}}}{\Phi_{\text{msand}}^m \cdot S_{W_{\text{sand}}}^n} \right]} + \frac{V_{\text{sh}}}{\left[\frac{a_{\text{sh}} \cdot R_{W_{\text{sh}}}}{\Phi_{\text{msh}}^m \cdot S_{W_{\text{sh}}}^n} \right]} \quad (5)$$

W celu określenia odpowiednich współczynników m, n i oporności R_w przy obliczaniu wpływu nasycenia S_w na



Ryc. 2. Interpretacja ilościowa litologii i porowatości (ścieżka 1), nasycenia wodą swobodną i związaną oraz węglowodorami resztkowymi i ruchomymi (ścieżka 2) wraz z pomierzonymi krzywymi oporności pozornej rejestrowanymi wybranymi sondami indukcyjnymi (HO09 i HO12), podwójnym laterologiem w wersji płytkiej (LLS) i głębokiej (LLD) oraz sondą mikrosferyczną (MSFL) (ścieżka 3). Na ścieżce 4 przedstawiono krzywe rejestrowane sondami potencjałowymi (E16N, E64N) oraz laterologiem trójelektrowym (LL3)

Fig. 2. Quantitative interpretation of lithology and porosity (track 1), free and bound water and residual and movable hydrocarbon saturations (track 2), selected apparent resistivity curves recorded with induction tools (HO09 and HO12) and dual laterolog tools in shallow (LLS) and deep investigation (LLD) versions, and micro-spherically focused log (MSFL) (track 3). Two normal tools (E16N, E64N) and laterolog (LL3) are shown (track 4)

Tab. 1. Parametry modelu piaskowcowo-łstego dla utworów mioceńskich zapadliska przedkarpackiego (Ciechanowska & Zalewska, 2004; Gąsior i in., 2004; Zorski & Twaróg, 2004, uzupełnione)
Table 1. Parameters of the sandstone-claystone model for Miocene deposits of the Carpathian Foredeep (Ciechanowska & Zalewska, 2004; Gąsior et al., 2004; Zorski & Twaróg, 2004, completed)

Parametr Parameter	Piaskowce, piaskowce mulowcowe Sandstones, muddy sandstones	Ilowce, ilowce mulowcowe Claystones, silty shales
Porowatość całkowita Φ_T Total Porosity Φ_T [-]	0,15–0,35 <i>0,14–0,33</i>	0
Mikroporowatość Φ_m Microporosity Φ_m [-]	0	0,05–0,15 <i>0,03–0,24</i>
Przepuszczalność K Permeability K [md]	1,0–11,5 <i>(7,1)*</i>	0,01–1,26 <i>(0,28)*</i>
Zdolność wymiany kationów odniesiona do jednostki masy – CEC Cation Exchange Capacity – CEC [mval/g]	0,01–0,1	0,15–0,25
Współczynnik cementacji m Cementation exponent m [-]	1,68 <i>(1,84)*</i>	1,68
Współczynnik zwilżalności n Saturation exponent n [-]	1,5 <i>1,9</i>	1,5 <i>1,9</i>
Przekrój czynny absorpcji neutronów Σ_a Neutron absorption cross section Σ_a [cm ² /g]	0,006–0,011	0,012–0,015

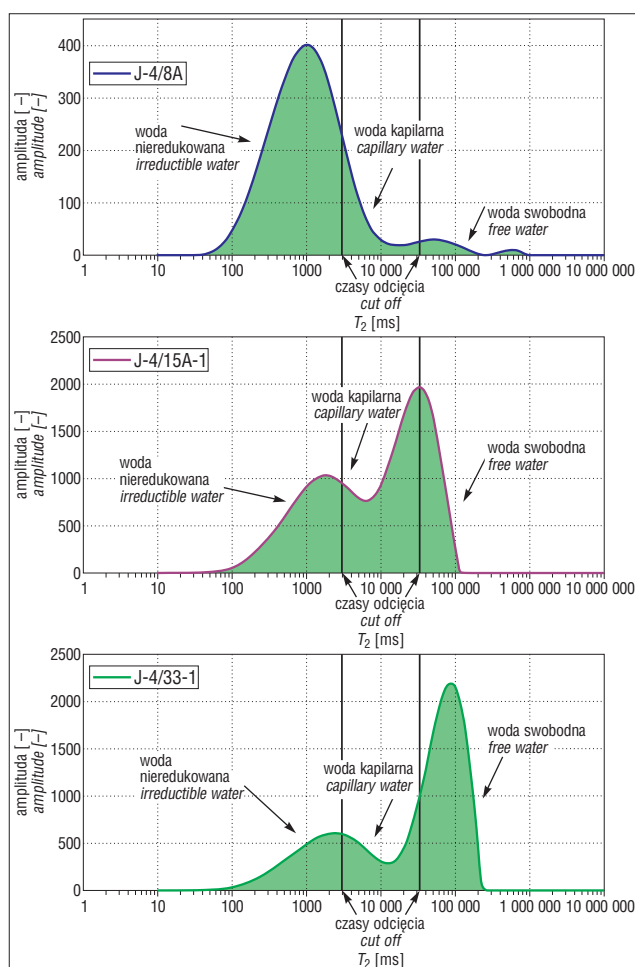
*Wartość średnia arytmetyczna (Ciechanowska & Zalewska, 2004). Zwykłym drukiem zaznaczono dane według Zorskiego (2004), pogrubioną kursywą – według Gąsior i in. (2004).

*Arithmetic average value (Ciechanowska & Zalewska, 2004). Data in upright font marked by Zorski (2004), in italics with bold – by Gąsior et al. (2004).

oporności R_V i R_H przeanalizowano wyniki badań laboratoryjnych oraz prace dotyczące rozpoznania parametrów najlepiej określających model skały mioceńskiej (Ciechanowska & Zalewska, 2004; Gąsior i in., 2004; Zorski & Twaróg, 2004). W tabeli 1 przedstawiono parametry takiego modelu.

Przeanalizowano również pomiary jądrowego rezonansu magnetycznego wykonane na kilkunastu próbkach z otworu Jasionka-4, które pozwoliły na określenie całkowitej porowatości oraz nasycenia wodą nieredukowalną, kapilarną i swobodną. Po podzieleniu powierzchni pod krzywymi (ryc. 3) na trzy części oceniana jest wielkość przestrzeni porowej wypełnionej wodą nieredukowalną ($Kp1$), wodą kapilarną ($Kp2$) oraz wodą swobodną ($Kp3$). Obliczane są współczynniki porowatości całkowitej Kp_{NMR} i efektywnej Kp_{efNMR} oraz współczynnik nasycenia wodą nieredukowalną S_{wir} . W tabeli 2 zestawiono wyniki pomiarów magnetycznego rezonansu jądrowego (*nuclear magnetic resonance* – NMR), z podziałem na wodę swobodną, kapilarną i związaną, przy zastosowaniu standardowych czasów granicznych (*cut off*) wynoszących 3 ms i ok. 33 ms dla wybranych próbek piaskowcowych (Zalewska, 2009).

Na rycinie 3 przedstawiono krzywe rozkładu nasycenia określone na podstawie pomierzonych czasów relaksacji



Ryc. 3. Krzywe rozkładu nasycenia określone na podstawie pomierzonych czasów relaksacji T_2 (skala pionowa próbki J-4/8A przewyższona pięciokrotnie)

Fig. 3. Saturation distribution curves determined from measured T_2 relaxation times (vertical scale of the sample J-4/8A is exaggerated five times)

T_2 dla trzech wybranych próbek o różnym nasyceniu wodą nieredukowalną i różnej porowatości, zaznaczonych w tabeli 2 kolorem szarym.

Z tabeli 2 i zamieszczonych na rycinie 3 krzywych można odczytać wyraźną zmienność nasycenia w przedziałach odpowiadających wodzie związanej z łałami (woda nieredukowalna), wodzie kapilarnej znajdującej się w mikroporach i wodzie swobodnej nasycającej makropory. Można nawet dokonać kalibracji skali czasów relaksacji T_2 w odpowiednie wartości rozmiarów porów (Coates i in., 1999). Jak sugeruje Fleury (2002), mikropory występują poniżej $T_2 < 10$ ms.

Rozpatrzono też prace dotyczące badań zmienności parametrów złożowych wyznaczonych na rdzeniach z otworów Jasionka-4 (J-4) i Chałupki Dębnińskie-3 (ChD-3) (Such, 2004). (Otwór testowy ChD-3 znajduje się na złożu Chałupki Dębnińskie). W pracy Sucha (2004) wydzielono cztery klasy podobieństwa wykształcenia przestrzeni porowej na podstawie współczynnika porowatości, wielkości średnicy progowej, wielkości efektu histerezy oraz wymiaru fraktalnego krzywych kumulacyjnych rozkładu średnic porów, jak również wykreślono charakterystyczne dla poszczególnych klas krzywe ciśnień kapilarnych.

Na rycinie 4 przedstawiono uśrednione krzywe ciśnień kapilarnych (w skali logarytmicznej) w funkcji nasycenia

Tab. 2. Wyniki pomiarów magnetycznego rezonansu jądrowego dla wybranych próbek z otworu Jasionka-4 (Zalewska, 2009)
Table 2. Results of nuclear magnetic resonance measurements for selected samples from Jasionka-4 well (Zalewska, 2009)

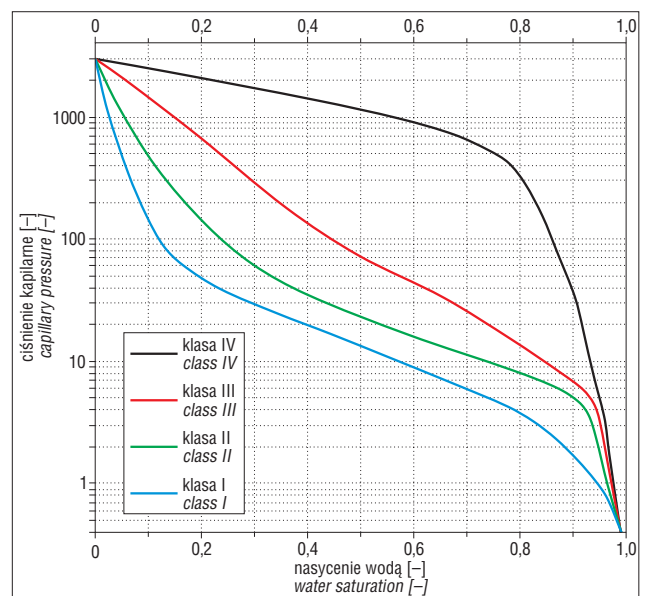
Numer rdzenia / interwał / numer skrzynki litologia <i>Core number / interval / box number lithology</i>	Zawartość wody <i>Water content</i> [-]			Współczynnik porowatości <i>Porosity coefficient</i> [-]		Współczynnik nasycenia wodą nieredukowalną <i>Irreducible water saturation coefficient</i> S_{wir} [-]
	nieredukowalna <i>irreducible</i> $Kp1$	kapilarna <i>capillary</i> $Kp2$	swobodna <i>free</i> $Kp3$	całkowita <i>total</i> Kp_{NMR}	efektywna <i>effective</i> Kp_{eNMR}	
J-4/8A / 981,0–990,0 m / II łupek, <i>shale</i>	0,024	0,003	0,001	0,029	0,004	0,846
J-4/14A-1 / 1156,0–1174,0 m / V piaskowiec zailony, <i>argillaceous sandstone</i>	0,135	0,113	0,017	0,266	0,130	0,509
J-4/15A-1 / 1156,0–1174,0 m / VII piaskowiec zailony, <i>argillaceous sandstone</i>	0,068	0,044	0,040	0,152	0,084	0,449
J-4/17A-1 / 1156,0–1174,0 m / X piaskowiec, <i>sandstone</i>	0,049	0,084	0,056	0,190	0,140	0,261
J-4/18A / 1156,0–1174,0 m / XII piaskowiec zailony, <i>argillaceous sandstone</i>	0,103	0,110	0,011	0,224	0,121	0,459
J-4/23A-1 / 1156,0–1174,0 m / XV piaskowiec, <i>sandstone</i>	0,063	0,102	0,066	0,231	0,168	0,273
J-4/25-1 / 1156,0–1174,0 m / XVI piaskowiec zailony, <i>argillaceous sandstone</i>	0,085	0,095	0,014	0,194	0,108	0,441
J-4/26-1 / 1333,0–1342,0 m / II piaskowiec, <i>sandstone</i>	0,073	0,098	0,061	0,232	0,159	0,314
J-4/30A-1 / 1333,0–1342,0 m / V piaskowiec zailony, <i>argillaceous sandstone</i>	0,105	0,084	0,003	0,191	0,087	0,547
J-4/33-1 / 1437,0–1446,0 m / V piaskowiec, <i>sandstone</i>	0,033	0,032	0,078	0,143	0,110	0,230
J-4/34B-1 / 1437,0–1446,0 m / II piaskowiec, <i>sandstone</i>	0,043	0,072	0,030	0,144	0,101	0,289

(przeliczone dla wody złożowej) wyznaczone dla próbek skał pobranych z otworów Jasionka-4 i Chałupki Dębnińskie-3 zaliczonych do klas od I do IV. W klasie I znajdują się piaskowce słabo zwięzłe, będące skałami o bardzo dobrej porowatości i dobrym wysortowaniu ziaren. Do klas II i III zaliczono skały porowate o podobnych średnicach progowych. Są to piaskowce warstwowane, ale w klasie III słabe wysortowanie ziaren zdecydowanie obniża ich zdolności transportu płynów złożowych. Klasa IV to iłowce o niskiej wartości średnicy progowej. W tej klasie można wyróżnić podklasę o porowatości $<0,02$, którą stanowią skały uszczelniające (Such, 2004).

Na podstawie krzywych ciśnień kapilarnych (ryc. 4) i rozkładu średnic porów (ryc. 5A, B) opracowano modele, dla których obliczono wartości oporności wzdłużnej w stosunku do warstwowania (R_H) i poprzecznej do niego (R_V) oraz współczynnik anizotropii (λ).

Model 1 składa się z przewarstwień utworów piaskowcowo-iłastych zaliczonych do klas I i IV, model 2 zawiera warstewki piaskowcowo-iłaste klas II i IV.

Analizując rozkłady średnic porów (ryc. 5A, B), można zauważyć, że utwory piaskowcowe (klasa I) charakteryzują się głównie obecnością porów o wielkości 0,1–50 μm (makropory), natomiast w klasie iłowców (typ IV) dominują pory o małych średnicach – 0,01–0,1 μm (mikropory). W klasie II średnica porów mieści się w podobnych granicach jak w klasie I. Jak sugeruje Such (2004), przestrzeń porową najlepiej charakteryzują takie parametry jak średnica progowa, wymiary fraktalne oraz procentowy udział porów o średnicach większych od 1 μm . W tabeli 3 przytoczono uśrednione parametry dla wydzielonych klas.

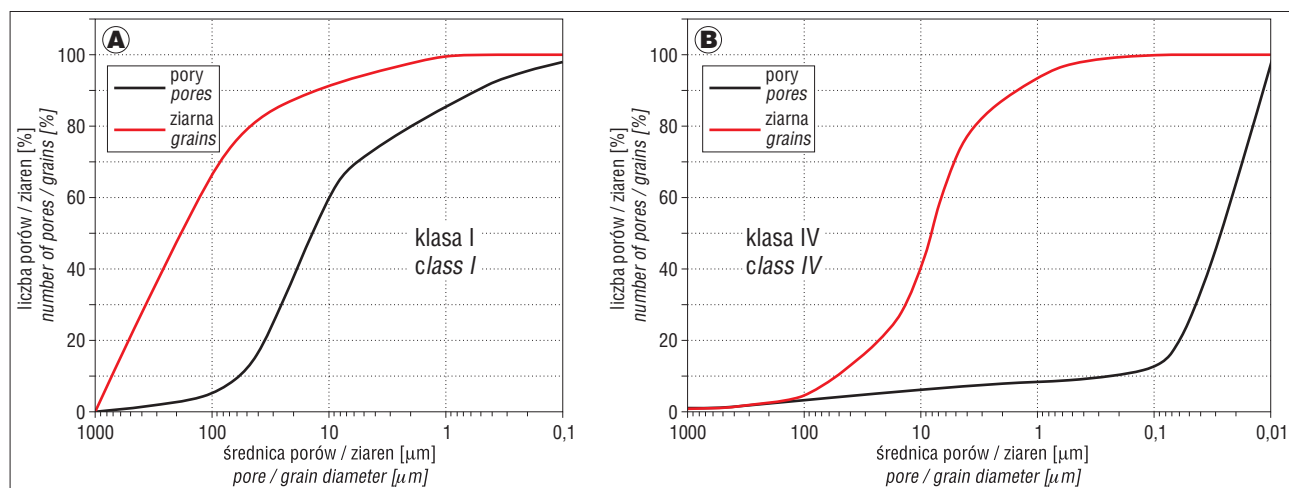


Ryc. 4. Krzywe ciśnień kapilarnych w funkcji nasycenia próbek wodą (S_{wT}) (Such, 2004)

Fig. 4. Capillary pressure curves as a function of water saturation of samples (S_{wT}) (Such, 2004)

Dane z rycin 4 i 5 wykorzystano do określenia nasycenia wodą w każdym z typów porowatości i w wybranych ciśnieniach kapilarnych. Całkowite nasycenie wodą (S_{wT}) dla każdego ciśnienia było określone przy użyciu równań (4) i (5). Do obliczeń przyjęto wartości podane w tabeli 4.

Na rycinie 6A przedstawiono wyniki obliczeń dla modeli typu (a) o 50-procentowym udziale obu frakcji. Dla



Ryc. 5. Rozkład średnic porów i ziaren dla: **A** – piaskowców (klasa I), **B** – ilowców (klasa IV) (Such, 2004)

Fig. 5. The distribution of pore and grain diameters for **A** – sandstones (class I) and **B** – claystones (class IV) (Such, 2004)

Tab. 3. Wybrane uśrednione parametry dla wydzielonych klas utworów miocenicznych na podstawie danych laboratoryjnych z otworów CHD-3 i J-4 (Such, 2004)

Table 3. Selected averaged parameters for separate classes for Miocene deposits, based of of laboratory data from wells ChD-3 and J-4 (Such, 2004)

Klasa Class	Porowatość Porosity [-]	Średnica progowa Pore size threshold [μm]	Pory >1 μm Pores >1 μm [%]	Własności filtracyjne Filtration properties
I	>0,12	15–30	>70	dobre good
II	>0,12	4–10	>50	umiarkowane medium
III	>0,08	4–10	<50	słabe poor
IV	różna variable	<1	<20	nieprzepuszczalne impermeable

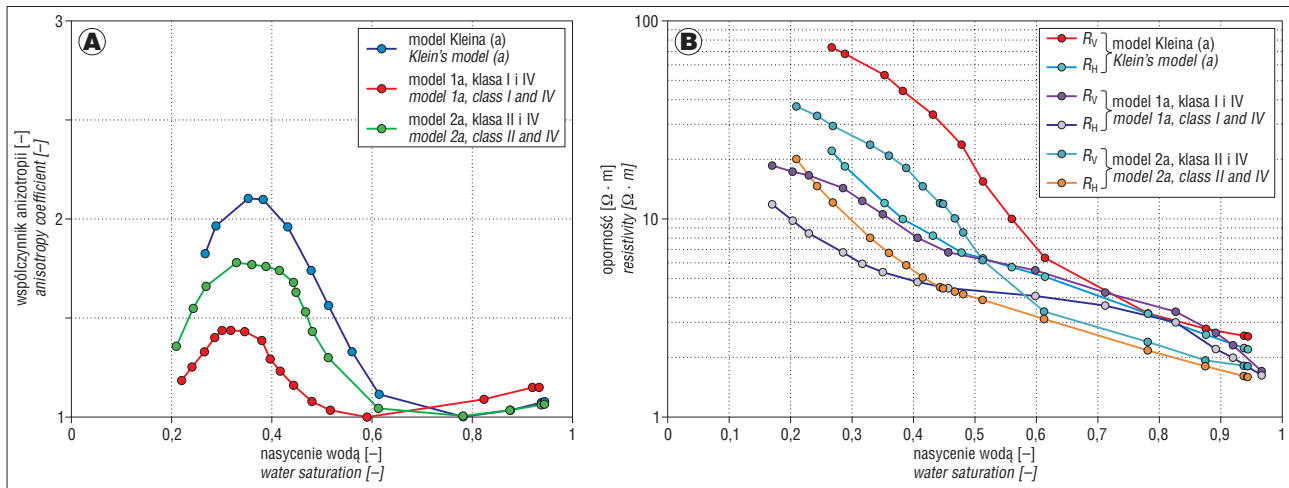
Tab. 4. Parametry modeli wykorzystane do obliczeń

Table 4. Parameters of models used in calculations

Model Model	Φ_{sand} [-]	V_{sand} [-]	R_{Wsand} [$\Omega \cdot \text{m}$]	m_{sand} [-]	n_{sand} [-]	Φ_{sh} [-]	V_{sh} [-]	R_{Wsh} [$\Omega \cdot \text{m}$]	m_{sh} [-]	n_{sh} [-]
Model 1a, klasa I i IV Model 1a, class I and IV	0,30	0,50	0,1	1,6	1,5	0,15	0,50	0,1	1,8	1,9
Model 1b, klasa I i IV Model 1b, class I and IV	0,30	0,75	0,1	1,6	1,5	0,15	0,25	0,1	1,8	1,9
Model 1c, klasa I i IV Model 1c, class I and IV	0,30	0,25	0,1	1,6	1,5	0,15	0,75	0,1	1,8	1,9
Model 2a, klasa II i IV Model 2a, class II and IV	0,25	0,50	0,1	1,7	1,5	0,15	0,50	0,1	1,7	2,0
Model 2b, klasa II i IV Model 2b, class II and IV	0,25	0,75	0,1	1,7	1,5	0,15	0,25	0,1	1,7	2,0
Model 2c, klasa II i IV Model 2c, class II and IV	0,25	0,25	0,1	1,7	1,5	0,15	0,75	0,1	1,7	2,0
Model Kleina (a) Klein's model (a)	0,28	0,50	0,1	2,0	2,0	0,17	0,50	0,1	2,0	2,0
Model Kleina (b) Klein's model (b)	0,28	0,75	0,1	2,0	2,0	0,17	0,25	0,1	2,0	2,0
Model Kleina (c) Klein's model (c)	0,28	0,25	0,1	2,0	2,0	0,17	0,75	0,1	2,0	2,0

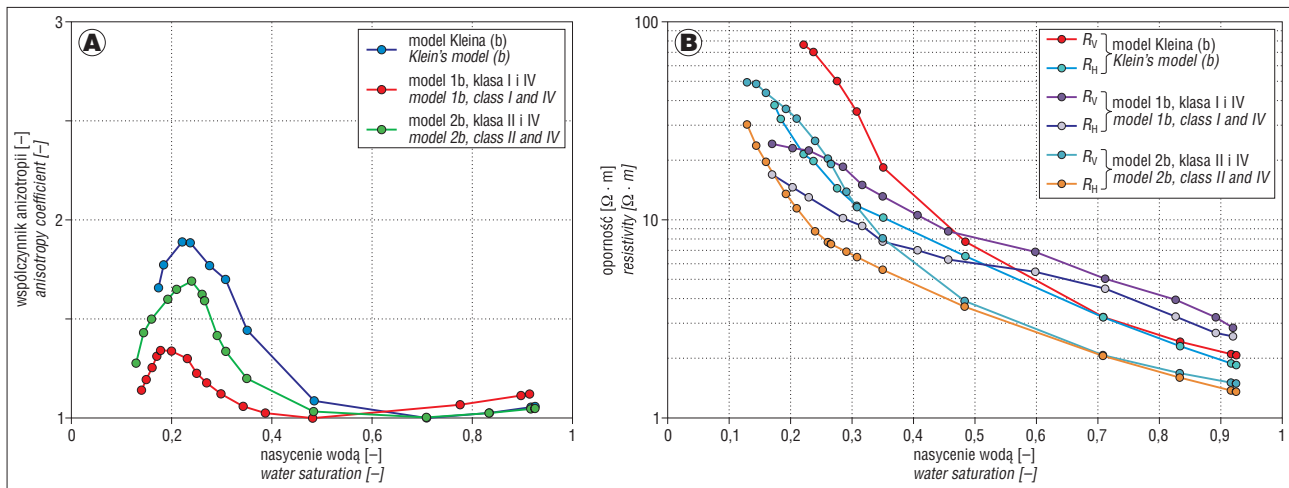
Objaśnienia: Φ_{sand} , Φ_{sh} – porowatość piaskowca i ilowca; V_{sand} , V_{sh} – objętość piaskowca i ilowca; R_{Wsand} , R_{Wsh} – oporność wody złożowej w piaskowcu i ilowcu; m_{sand} , m_{sh} – współczynnik cementacji piaskowca i ilowca; n_{sand} , n_{sh} – współczynnik zwilżalności piaskowca i ilowca.

Explanations: Φ_{sand} , Φ_{sh} – porosity of sandstone and shale; V_{sand} , V_{sh} – volume of sandstone and shale; R_{Wsand} , R_{Wsh} – resistivity of water in sandstone and shale; m_{sand} , m_{sh} – cementation coefficient for sandstone and shale; n_{sand} , n_{sh} – saturation exponent for sandstone and shale.



Ryc. 6. A – współczynniki anizotropii (λ) w funkcji nasycenia wodą (S_{WT}); modele typu (a); $V_{sand} = V_{sh} = 0,5$. **B** – oporność poprzeczna R_V i wzdłużna R_H w funkcji nasycenia wodą; modele typu (a); $V_{sand} = V_{sh} = 0,5$

Fig. 6. A – anisotropy coefficients (λ) as a function of water saturation (S_{WT}); model type (a); $V_{sand} = V_{sh} = 0.5$. **B** – vertical resistivity R_V and horizontal resistivity R_H as a function of water saturation; model type (a); $V_{sand} = V_{sh} = 0.5$



Ryc. 7. A – współczynniki anizotropii (λ) w funkcji nasycenia wodą (S_{WT}); modele typu (b); $V_{sand} = 0,75$ i $V_{sh} = 0,25$. **B** – oporność poprzeczna R_V i wzdłużna R_H w funkcji nasycenia wodą; modele typu (b); $V_{sand} = 0,75$ i $V_{sh} = 0,25$

Fig. 7. A – anisotropy coefficients (λ) as a function of water saturation (S_{WT}); model type (b); $V_{sand} = 0.75$ and $V_{sh} = 0.25$. **B** – vertical resistivity R_V and horizontal resistivity R_H as a function of water saturation; model type (b); $V_{sand} = 0.75$ and $V_{sh} = 0.25$

Na rycinie 6B przedstawiono zmiany oporności zarówno wzdłużnej R_H , jak i poprzecznej R_V w funkcji nasycenia S_{WT} , obliczone dla omawianych modeli. Krzywe są do siebie zbliżone kształtem i zachowują się podobnie ze zmianą nasycenia, jednak różnią się wartościami, szczególnie przy niskim całkowitym nasyceniu S_{WT} . Przy wysokim nasyceniu wodą warstwy wykazują tylko nieznaczną anizotropię, co jest spowodowane różnicą w rozkładzie makro- i mikroporowatości dwóch typów ośrodków rozpatrywanych w modelach.

Podobne obliczenia wykonano dla innych proporcji udziału warstw piaskowca i ilowca zawierających makro- i mikropory (modele typu b) (ryc. 7A, B). Założono te same parametry w modelach (tab. 4), zmieniono jednak objętości na $V_{sand} = 0,75$ i $V_{sh} = 0,25$.

Sam kształt obliczonych krzywych się nie zmienił, nieco zmalały wartości współczynnika anizotropii, maksyma (bardziej skupione) przesunęły się w stronę mniejszego nasycenia S_{WT} , a oporności R_V i R_H nieco wzrosły dla mniejszego nasycenia wodą (ryc. 7B).

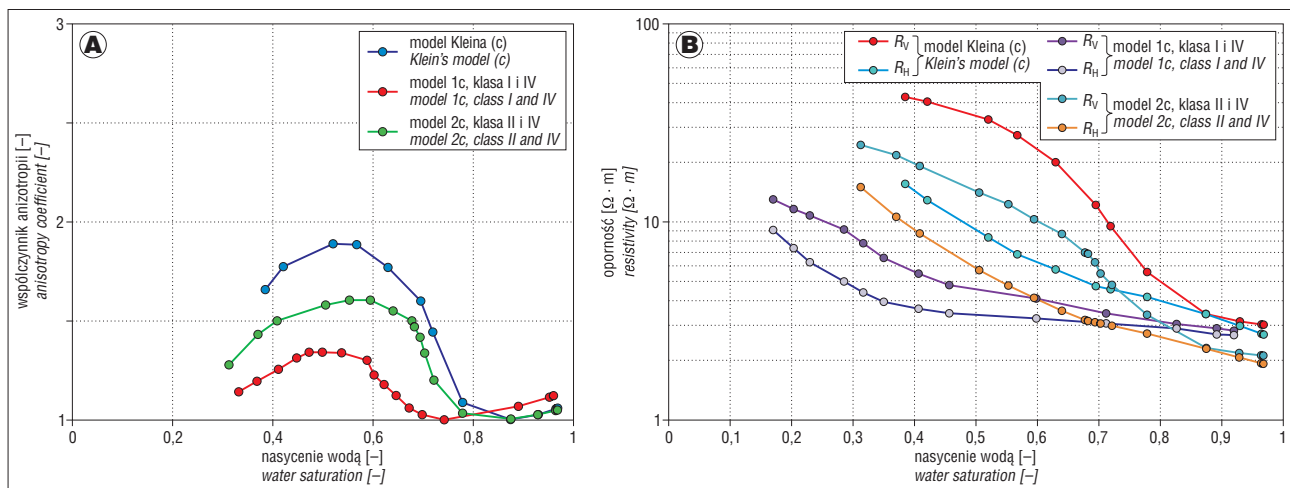
Dla trzeciego wariantu proporcji piaskowca i ilowca ($V_{sand} = 0,25$, $V_{sh} = 0,75$) wyniki zamieszczono na wykresach na rycinach 8A i 8B (modele typu c).

Jak widać, wszystkie krzywe obrazujące zależności współczynnika anizotropii w funkcji nasycenia makro- i mikroporów przesunęły się teraz w stronę prawą, a maksyma są znacznie szersze. Wartości maksymalne współczynnika wynoszą: dla modelu Kleina (c) $\lambda = 1,89$, dla modelu 1c $\lambda = 1,34$ i dla modelu 2c $\lambda = 1,6$.

Zmieniły się również krzywe oporności poprzecznej do warstwowania R_V i wzdłużnej w stosunku do niego R_H obliczone dla zadanych proporcji $V_{sand} = 0,25$ i $V_{sh} = 0,75$. Zmalał wyraźnie udział przestrzeni porów większych, a wzrósł udział frakcji z mikroporami, co pociągnęło za sobą obniżenie obu oporności.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Analiza opracowana na podstawie zmian krzywych ciśnień kapilarnych dla dwóch ośrodków o zróżnicowanym



Ryc. 8. A – współczynniki anizotropii (λ) w funkcji nasycenia wodą (S_{WT}); modele typu (c); $V_{sand} = 0,25$ i $V_{sh} = 0,75$. **B** – oporność poprzeczna R_V i wzdłużna R_H w funkcji nasycenia wodą; modele typu (c); $V_{sand} = 0,25$ i $V_{sh} = 0,75$

Fig. 8. A – anisotropy coefficients (λ) as a function of water saturation (S_{WT}); model type (c); $V_{sand} = 0.25$ and $V_{sh} = 0.75$. **B** – vertical resistivity R_V and horizontal resistivity R_H as a function of water saturation; model type (c); $V_{sand} = 0.25$ and $V_{sh} = 0.75$

rozkładzie makro- i mikroporów wskazuje na bardzo skomplikowany charakter anizotropii elektrycznej takich formacji.

Zachowanie się współczynnika anizotropii λ w zależności od zmiany nasycenia wodą i gazem zależy bardzo silnie od ukształtowania przestrzeni porowej opisanej wewnętrznym rozkładem rozmiarów porów, który powoduje zmiany w elektrycznej oporności mierzonej wzdłuż warstwowania R_H i prostopadłe do niego R_V .

Gdy nasycenie całkowite wodą (S_{WT}) w modelu złożonym z ośrodków zawierających mikro- i makropory obniża się, warstewki z makroporami szybciej tracą wodę w porównaniu z mikroporami i $S_{W_{sand}}$ jest znacznie niższe niż $S_{W_{sh}}$. W takim przypadku oporność w warstewkach z makroporami jest wyższa niż w tych zawierających mikropory i współczynnik anizotropii rośnie i osiąga maksimum bliskie S_{wir} resztkowego nasycenia. Dalsze obniżanie S_{WT} poniżej S_{wir} powoduje, że mikropory tracą wodę szybciej i wartości $S_{W_{sand}}$ i $S_{W_{sh}}$ stają się podobne, a współczynnik λ maleje.

Kształty krzywych R_H i R_V oraz współczynnika anizotropii w funkcji nasycenia S_{WT} także są uzależnione od proporcji poszczególnych frakcji z makro- i mikroporami w profilu warstw piaskowcowo-mułowcowo-iltych.

Można więc stwierdzić, że anizotropia oporności jest wywołana zarówno zmianą nasycenia wodą i gazem w mikro- (przewarstwienia iltaste) i makroporach (warstewki piaskowców i mułowców) utworów miocenu, jak i zmiennością miąższości tych przewarstwień, co w sposób ewidentny zaznacza się w oporności pozornej mierzonej różnymi sondami elektrycznymi. Sondy indukcyjne (HRAI) pozwalają uzyskać informację o oporności wzdłuż warstwowania (R_H), a sondy sterowane (LLD) rejestrują oporność będącą wynikiem oddziaływania obu oporności R_H i R_V (Bała, 2011).

Wykorzystanie koncepcji anizotropii spowodowanej makro- i mikroporowością w analizie nasycenia mioceńskich skał gazonośnych częściowo wyjaśnia stosunkowo niską oporność rejestrowaną sondami elektrycznymi w strefach złożowych, w których należałoby się spodziewać znacznego ich podwyższenia (ryc. 2).

Praca została wykonana w ramach projektu badawczego nr NN 525 363537 realizowanego w latach 2009–2012 pod kierunkiem Marii Bały, finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Autorka dziękuje PGNiG SA w Warszawie za udostępnienie danych do badań w ramach niniejszego projektu.

LITERATURA

- ANDERSON B.I., BARBER T.D. & HABASHY T.M. 2002 – The interpretation and inversion of fully triaxial induction data; a sensitivity study. [W:] SPWLA 43rd Annual Logging Symposium, Oiso, Japan, June 2–5, 2002. Soc. Petrophys. Well Log Anal., Conf. Pap., 2002-O.
- ANDERSON B., BARBER T., LEVERIDGE R., BASTIA R., SAXENA K.R., TYAGI A.K., CLAVAUD J.-B., COFFIN B., DAS M., HAYDEN R., KLIMENTOS T., MINH CH.C. & WILLIAMS S. 2008 – Triaxial induction – a new angle for an old measurement. *Oilfield Rev.*, 20: 64–84.
- BAŁA M. 2009 – Badanie wpływu anizotropii i zailenia na prędkości rozchodzenia się fal podłużnych i poprzecznych oraz innych parametrów sprężystych skał klastycznych. *Kwart. AGH Geologia*, 35: 559–566.
- BAŁA M. 2010 – Badanie wpływu własności anizotropowych mioceńskich skał piaskowcowo-iltych na prędkości fal oraz oporności rejestrowane w otworach. [W:] Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna GEOPETROL 2010 nt. „Nowe metody i technologie zagospodarowania złóż i wydobycia węglowodorów w warunkach lądowych i morskich”, Zakopane, 20–23 września 2010 r. *Pr. Nauk. INiG*, 170: 651–655.
- BAŁA M. 2011 – Evaluation of electric parameters of anisotropic sandy-shaly Miocene formations on the basis of resistivity logs. *Acta Geophys.*, 59: 954–966.
- BITTAR M.S. & RODNEY P.F. 1994 – The effects of rock anisotropy on MWD electromagnetic wave resistivity sensors. [W:] SPWLA 35th Annual Logging Symposium, Tulsa, USA, June 19–22, 1994. Soc. Petrophys. Well Log Anal., Conf. Pap., 1994-PP.
- CHEMALI R., GIANZERO S.C. & SU S.M. 1987 – The effect of shale anisotropy on focused resistivity devices. [W:] SPWLA 28th Annual Logging Symposium, London, England, June 29–July 2, 1987. Soc. Petrophys. Well Log Anal., Conf. Pap., 1987-H.
- CIECHANOWSKA M. & ZALEWSKA J. 2004 – Wskaźnik struktury porowej skał zailonych m*. [W:] Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna GEOPETROL 2004 nt. „Efektywne technologie poszukiwania i eksploatacji złóż węglowodorów”, Zakopane, 20–23 września 2004 r. *Pr. Nauk. INiG*, 130: 335–339.
- COATES G.R., XIAO L. & PRAMMER M.G. 1999 – NMR logging: principles and applications. Halliburton Ener. Serv., Houston, s. 234.
- DACHNOW W.N. 1967 – Elektrizeskije i magnitnyje metody issledowanija skważyn. *Osnovy Teorii*. Niedra, Moskwa, s. 392.

- FAIVRE O., BARBER T., JAMMES L. & VUHOANG D. 2002 – Using array induction and array laterolog data to characterize resistivity anisotropy in vertical wells. [W:] SPWLA 43rd Annual Logging Symposium, Oiso, Japan, June 2–5, 2002. Soc. Petrophys. Well Log Anal., Conf. Pap., 2002-M.
- FLEURY M. 2002 – Resistivity in carbonates: new insights. [W:] Proceeding of the International Symposium of the Society of Core Analysts, Monterey, USA, September 22–25, 2002. Pap. 2002-28.
- GAŚSIOR I., KLAJA J., KOWALSKA S., PRZELASKOWSKA A. & ZALEWSKA J. 2004 – Analiza rozkładu nasycenia wodą przestrzeni porowej skał miocenijskich na podstawie badań metodą NMR. [W:] Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna GEOPETROL 2004 nt. „Efektywne technologie poszukiwania i eksploatacji złóż węgłowodorów”, Zakopane, 20–23 września 2004 r. Pr. Nauk. INiG, 130: 813–817.
- HAGIWARA T. 1996 – A new method to determine horizontal resistivity in anisotropic formations without prior knowledge of relative dip. [W:] SPWLA 37th Annual Logging Symposium, New Orleans, USA, June 16–19, 1996. Soc. Petrophys. Well Log Anal., Conf. Pap., 1996-Q.
- KLEIN J.D. 1993 – Induction log anisotropy corrections. Log Anal., 34: 18–27.
- KLEIN J.D., MARTIN P.R. & ALLEN D.F. 1997 – The petrophysics of electrically anisotropic reservoirs. Log Anal., 38: 25–36.
- KUNZ K.S. & MORAN J.H. 1958 – Some effects of formation anisotropy on resistivity measurements in boreholes. Geophysics, 23: 770–794.
- MYŚLIWIEC M., MADEJ K. & BYŚ I. 2004 – Złóża gazu ziemnego w osadach miocenu rejonu Rzeszowa (zapadlisko przedkarpackie) odkryte na podstawie wyników nowoczesnej kompleksowej interpretacji danych sejsmicznych. Prz. Geol., 52: 501–506.
- RÖSTHAL R., BARBER T., BONNER S., CHEN K.-CH., DAVYDYCHEVA S., HAZEN G., HOMAN D., KIBBE K., MINERBO G., SCHLEIN R., VILLEGAS L., WANG H. & ZHOU F. 2003 – Field test results of an experimental fully triaxial induction tool. [W:] SPWLA 44th Annual Logging Symposium, Galveston, Texas, June 22–25, 2003. Soc. Petrophys. Well Log Anal., Conf. Pap., Paper QQ.
- SUCH P. 2004 – Analiza właściwości zbiornikowych i filtracyjnych rdzeni z otworów Chałupki Dębnińskie-3 i Jasionka-4. [W:] Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna GEOPETROL 2004 nt. „Efektywne technologie poszukiwania i eksploatacji złóż węgłowodorów”, Zakopane, 20–23 września 2004 r. Pr. Nauk. INiG, 130: 793–796.
- TABANOU J.R., CHEUNG P., LIU CH.B., HANSEN S., LAVIGNE J., OMERAGIC D., PICKENS T., BORBAS T. & WENDT B. 2002 – Thinly laminated reservoir evaluation in oil-base mud: high resolution versus bulk anisotropy measurement comprehensive evaluation. [W:] SPWLA 43rd Annual Logging Symposium, Oiso, Japan, June 2–5, 2002. Soc. Petrophys. Well Log Anal., Conf. Pap., 2002-P.
- ZAJKOWSKI N.J., KOWALENKO D.J. & KULINKOWICZ A.J. 1965 – Opredzielenije paramietrow anizotropnogo płasta po kriwym BKZ. Prikl. Geofiz., 46: 213–216.
- ZALEWSKA J. 2009 – Wyniki badań laboratoryjnych dla otworu Jasionka-4. [W:] BAŁA M. i in. 2012 – Modelowania teoretyczne i empiryczne wpływu zmiennego ciśnienia i nasycenia gazem na parametry sprężyste, gęstość i oporność skał dla oceny przepuszczalności z danych geofizyki otworowej. Projekt badawczy NN 525 363537 (2009–2012). Arch. Kat. Geofiz. Wydz. Geol. Geofiz. Ochr. Środ. AGH, Kraków: 1–177.
- ZHAO J., ZHOU D., LI X., CHEN R. & YANG C. 1994 – Laboratory measurement and applications of anisotropy parameters of rocks. [W:] SPWLA 35th Annual Logging Symposium, Tulsa, USA, June 19–22, 1994. Soc. Petrophys. Well Log Anal., Conf. Pap., 1994-LLL.
- ZORSKI T. & TWARÓG W. 2004 – Metoda wyznaczania wodonasylenia piaskowcowo-iłastych kompleksów cienkowarstwowych, stosowana w programie SATUN systemu GeoWin. [W:] Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna GEOPETROL 2004 nt. „Efektywne technologie poszukiwania i eksploatacji złóż węgłowodorów”, Zakopane, 20–23 września 2004 r. Pr. Nauk. INiG, 130: 743–758.

Praca wpłynęła do redakcji 7.08.2012 r.

Po recenzji akceptowano do druku 28.11.2012 r.