

## Rola geofizyki wiertniczej w określeniu zasobów gazu ziemnego w łupkach

Krzysztof Drop<sup>1</sup>, Maciej Kozłowski<sup>2</sup>



K. Drop



M. Kozłowski

**Application of wire log analysis for petrophysical evaluation and determination of shale gas reserves.** *Prz. Geol.*, 58: 263–265.

*Abstract.* The paper presents differences between conventional and shale gas plays (Tab. 1). Shale gas concept comprises a wide range of reservoirs, from the coalbed to tight gas plays. In Europe, where the shale gas rush has just started, shaly rocks were treated so far as unproductive and high quality data sets necessary for evaluating properties of those rocks are usually missing. Therefore, US shale gas plays like Barnett and Haynesville are widely used as valuable reference tools (Jacobi, 2008; Parker, 2009).

Coal, where gas is essentially stored entirely by sorption, represents one end of the unconventional gas spectrum and tight gas sands, where gas is essentially stored by compression only — the other end of that spectrum. In turn, shale reservoirs with gas entrapped by sorption and com-

pression, fill the space between the two endpoints. Differentiation of those two components is one of the primary goals of an analysis program. Shale gas reservoirs are formed by a wide variety of rock types which makes it necessary to use most appropriate technologies to characterize both coalbed and tight gas reservoirs.

The current paper concentrates on tools for evaluating petrophysical parameters, most suitable for shale gas plays. In the case of old wells with old fashion Soviet logs, the uncompensated neutron gamma tool was commonly used tool. This was the only porosity reading curve in log suite, "neutron porosity curve" which could be overlaid with natural gamma ray (GR) (Fig. 1). Natural gamma ray curve is a good indicator of organic matter, which adsorbed uranium. Other hydrocarbon signatures can be traced on the basis of SP vs GR, GR vs resistivity. Some of hydrocarbon signatures can be related to TOC from core lab measurements.

For contemporary good quality wire line log curves the Passey et al. (1990) method has been applied. This method is based on computation of separation between acoustic transit time and resistivity ( $\Delta R$ ) (Fig. 2). The resulting difference is used to calculate TOC taking into consideration maturity of organic matter which is parameter for a bunch of relationships (TOC vs  $\Delta R$ ). Local calibration  $\Delta R$  to TOC from cores are required. In order to determine reliable relationships between  $\Delta R$ , gas contents to TOC, the high technology coring service and sensitive laboratory measurements are necessary.

The results of petrophysical analyses are important for estimations of gas resources in shales. The formulas for computation of conventional and unconventional gas reserves are generally similar. However, in the case of the unconventional gas reserves, instead of porosity reservoir storage the rock density is applied, and for determinations of hydrocarbon volume — the gas content is applied in place of hydrocarbon saturation.

If European unconventional reservoirs turn to be profitable then continent landscape will also change. The big gas fields would require dense networks of rigs that will have some negative environmental impact. This would require a change in industry structure, as well as in public opinion and legal regulations.

**Keywords:** shale gas, petrophysical interpretation, Silurian Shale

Pod pojęciem niekonwencjonalnych zasobów węglowodorów należy rozumieć pełne spektrum obecności węglowodorów — od gazu adsorbowanego w węglu (*coal bed methane*) poprzez gaz zgromadzony w przestrzeni porowej słabo przepuszczalnych mułowców (*tight gas*). Pomiędzy tymi skrajnymi typami akumulacji gazu ziemnego znajdują się różne rodzaje złóż, nazywane potocznie gazem z łupków (*shale gas*). Główne cechy odróżniające złoża konwencjonalne od niekonwencjonalnych zostały przedstawione w tabeli 1.

Różnice pomiędzy wymienionymi typami akumulacji węglowodorów są widoczne na etapie rozpoznawania złóż. Problem wyboru optymalnego miejsca na odwiercenie otworu w przypadku gazu z łupków staje się drugorzędny, na pierwszy plan zaś wysuwa się regionalne rozpoznanie całego basenu sedymentacyjnego i odpowiednie odwiercenie otworów pilotażowych, pozyskiwanie rdzenia wiertniczego i zastosowanie zaawansowanych badań laboratoryjnych.

W Europie, ze względu na brak wystarczającego rozpoznania niekonwencjonalnych złóż węglowodorów, jest konieczne szukanie analogii do znanych złóż ze Stanów Zjednoczonych (Barnett, Antrim, Haynesville i New Albany), a następnie analizowanie archiwalnych danych według współczesnych standardów wypracowanych w USA (Jacobi, 2008; Parker, 2009).

Zasady interpretacji wyników badań geofizycznych podczas rozpoznawania złóż niekonwencjonalnych, w szczególności złóż gazu ziemnego w łupkach, również są niekonwencjonalne. Dla starych otworów wiertniczych mających komplet pomiarów opartych na sowieckich technologiach (do lat 90.) stosuje się metodę normalizacji i złożenia krzywych geofizycznych (ryc. 1). Stosując tę metodę, można wytypować strefy anomalnego rozejścia się krzywych w interwałach zawierających gaz wolny lub węglowodory ciekłe. Na podstawie tych materiałów można wykonać korelację pomiędzy zawartością materii organicznej (TOC) a odpowiednią funkcją kilku krzywych, jednak poziom ufności tych analiz jest niski ze względu na złą jakość pomiarów (często przez stan otworu) oraz danych laboratoryjnych.

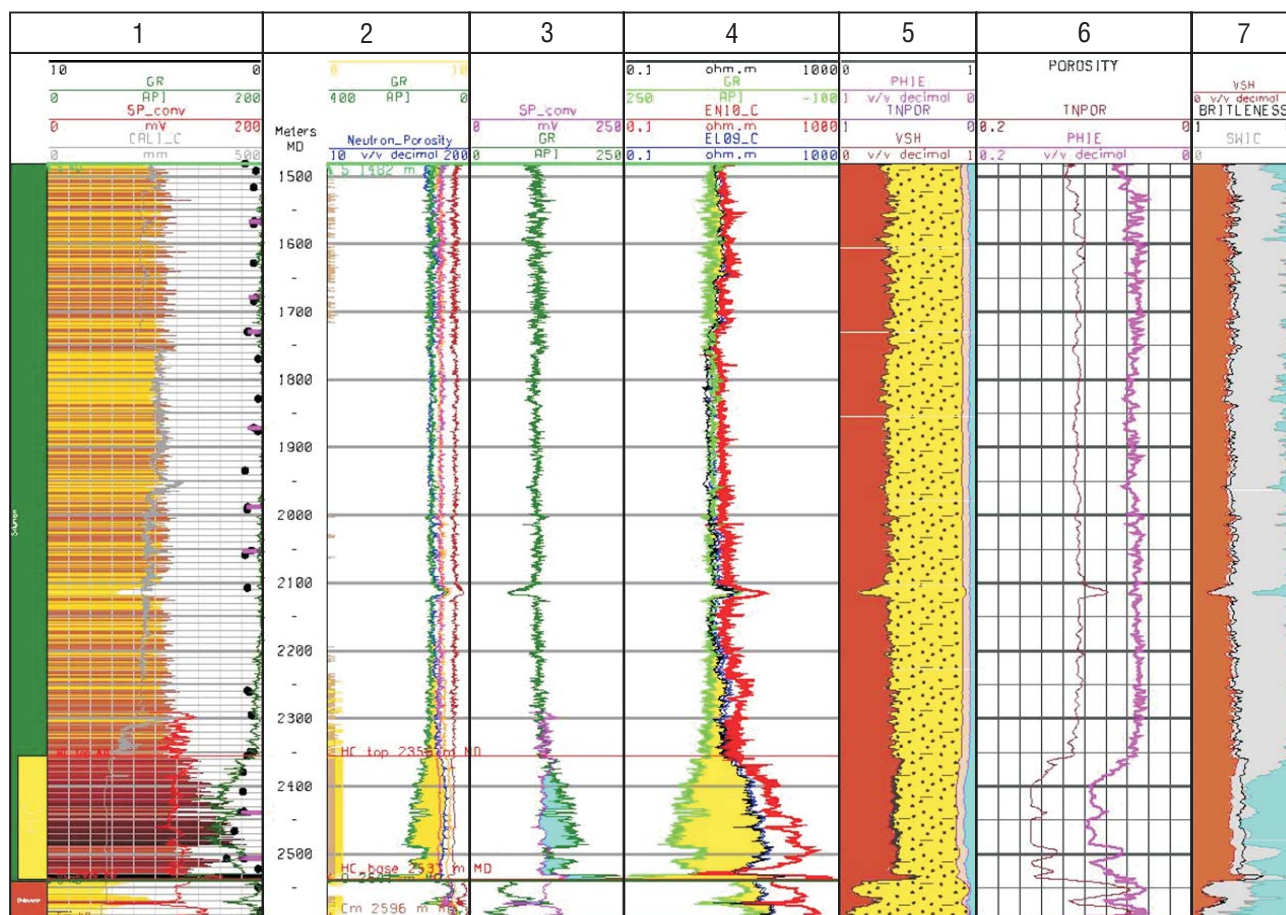
Do współczesnych danych geofizyki wiertniczej jest stosowana metoda Passey'a i in. (1990) oparta na normalizacji krzywej czasu propagacji fali podłużnej w ośrodku skalnym (DT) i oporności sterowanej dalekiego zasięgu

<sup>1</sup>Halliburton Digital & Consulting Solutions Division, ul. Lubicz 23, 31-503 Kraków; Krzysztof.Drop@halliburton.com

<sup>2</sup>Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo SA, Oddział w Zielonej Górze, ul. Boh. Westerplatte 15, 65-034 Zielona Góra; maciej.kozlowski@zggng.com.pl

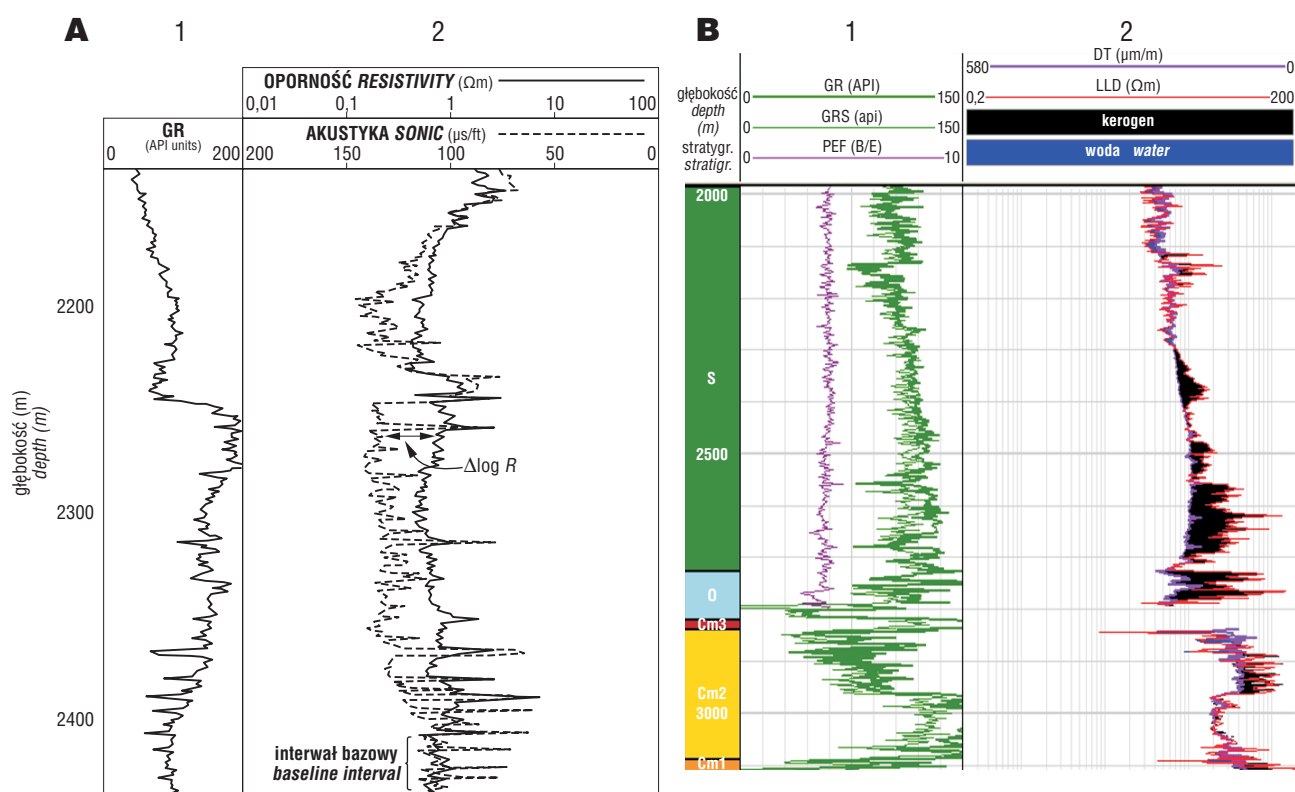
**Tab. 1. Porównanie charakterystyki złóż konwencjonalnych i złóż gazu w łupkach**  
 Table 1. Comparison of characteristic features of conventional and shale gas reservoirs

Złoże konwencjonalne <i>Conventional reservoirs</i>	Złoże gazu w łupkach <i>Shale gas reservoirs</i>
Akumulacja gazu w przestrzeni porowej <i>Gas held within pore space</i>	Gas zaabsorbowany w mikroporach i gaz zakumulowany w przestrzeni porowej <i>Gas adsorbed within micropores and held in pore space</i>
Przepływ medium podlega prawu Darcy'go <i>Gas flow governed by Darcy's law</i>	Dyfuzja wg prawa Ficka, następnie zgodnie z prawem Darcy'go <i>Diffusion governed by Fick's law and flow in macropores and fractures — by Darcy's law</i>
Nasylenie gazem równe (1 – zawodnienie) <i>Gas content as (1 – water saturation) from logs</i>	Nasylenie gazem wyznaczone z badań laboratoryjnych <i>Gas content as shown by laboratory data</i>
Wykładnik wodny rośnie wraz z czasem eksploatacji <i>Gas to water index growing along with exploitation</i>	Wykładnik wodny może narastać po eksploatacji gazu z przestrzeni porowej, następnie maleje podczas desorpcji gazu <i>Gas to water index may increase after exploitation to decrease at desorption stage</i>
Skala zbiornikowa <i>Reservoir rock</i>	Skala macierzysta = skała zbiornikowa <i>Source rock = reservoir rock</i>
Opcjonalne szczelinowanie hydrauliczne <i>Hydraulic fracturing as option</i>	Wymagane szczelinowanie hydrauliczne do stymulacji produkcji <i>Hydraulic fracturing necessary for well stimulation</i>
Przepuszczalność słabo zależna od ciśnienia <i>Permeability weakly dependent on pressure</i>	Przepuszczalność silnie zależna od ciśnienia <i>Permeability highly dependent on pressure</i>
Wielkość porów od 1 μ do 1 mm <i>Macropore size: 1 μ to 1 mm</i>	Wielkość porów od <5 Å do 50 Å <i>Micropore size: &lt;5 Å to 50 Å</i>



**Ryc. 1.** Normalizacja krzywych ze starych pomiarów geofizycznych. Widoczne są anomalne strefy obecności węglowodorów (kolor żółty). **1** — GR (przekalibrowana na jednostki API), ciemnobrązowy kolor wypełnienia krzywej wskazuje podwyższoną zawartość materii organicznej, kropki — TOC z pomiarów laboratoryjnych rdzeni, różowe kreski — stopień dojrzałości materii organicznej, zielona krzywa — obliczona krzywa TOC jako funkcja rozejsć między krzywymi (żółte pola); **2** — złożenie krzywych GR i neutron-gamma (jednostki niestandardowe) wskazuje na obecność gazu wolnego; **3** — rozejsć krzywych SP (mV) i GR pokazuje przewyższenie wskazań niestandardowe (GR) spowodowane obecnością materii organicznej, podczas gdy polaryzacja naturalna pola elektrycznego (SP) nie wykazuje anomalii; **4** — złożenie GR (zielona krzywa) i oporności (czarna krzywa) wskazuje na obecność węglowodorów; **5** — analiza objętości minerałów skały; **6** — porowatość efektywna (różowa linia) i całkowita; **7** — zestawienie nasycenia skały. Dzięki uprzejmości firmy *Realm Energy*

**Fig. 1.** Normalized old-fashion curves. Note zones of HC saturation (yellow — separation curves space). **1** — GR dark brown curve fill indicates the highest content of organic matter (dots — TOC from cores, purple sticks — *Ro* maturity, green curve — TOC as the function of GR and neutron-gamma separation from track 2); **2** — GR and neutron-gamma the free gas signature; **3** — SP-GR showing how much organic matter increases GR reading while SP indicates still almost constant value; **4** — GR vs resistivity shows HC saturation; **5** — minerals volume; **6** — total (black) and effective porosity; **7** — saturation. Courtesy of *Realm Energy*



**Ryc. 2.** Idea relacji pomiędzy krzywymi przebiegu czasu akustycznego i oporności zastosowana w metodzie Passey'a. **A** — klasyczny przykład z USA (Passey i in., 1990) i **B** — z basenu bałtyckiego. Dla **A** i **B** kolumna 1 — GR, kolumna 2 — złożenie krzywych DT (profilowanie akustyczne) i oporności

**Fig. 1.** **A** — The conception of relationship between sonic and resistivity utilized in the Passey method of TOC determinations (Passey et al., 1990); **B** — an example from Baltic Basin for old Paleozoic. For **A** and **B** — track 1 GR; track 2 — sonic and resistivity

(LLD) (ryc. 2). Ilościowym obrazem anomalii w profilowaniach geofizyki wiertniczej jest krzywa  $\Delta \log R$ , oparta na stopniu dojrzałości materii organicznej (LOM) i wyznaczonych współczynnikach, która następnie jest przeliczana na wartości TOC. Metoda ta została stworzona w USA, a współczynniki przeliczania krzywej  $\Delta \log R$  (ryc. 2A) zostały skalibrowane o dane z tamtejszych złóż. Współczynniki te należy skalibrować na nowo dla warunków polskiego syluru, co będzie możliwe dopiero po odwierceniu kilku otworów.

Wyniki interpretacji danych geofizyki wiertniczej pełnią istotną funkcję podczas obliczania zasobów geologicznych gazu ziemnego zgromadzonego w łupkach. Procedury obliczenia zasobów złóż konwencjonalnych i tych niekonwencjonalnych są podobne. Różnice występują podczas określenia objętości zbiornikowej skały, w której rolę porowatości w złożach niekonwencjonalnych przejmuje gęstość skały, nasycenie węglowodorami zaś ma swój odpowiednik w ilości gazu wyrażonej w metrach sześciennych na tonę skały (po uwzględnieniu ekspansji gazu).

Należy również uwzględnić to, że niekonwencjonalne złoża mogą funkcjonować na granicy ekonomicznej opłacalności. Powoduje to stosowanie odpowiednich procedur decyzyjnych, jak np. modelowanie wielu scenariuszy (*asset decision solutions*) na etapie rozpoznania geologicznego czy budowy kopalni.

Jeśli w Europie niekonwencjonalne złoża okażą się atrakcyjne dla inwestorów, wówczas krajobraz obszarów eksploatacji ulegnie zmianom. Niekonwencjonalne złoża gazu ziemnego wymagają gęstej siatki wierceni, co będzie miało negatywny skutek ekologiczny. Przypuszczalnie

wpłyne to na zmiany w strukturze przemysłu i w prawie, a także będzie wymagać konfrontacji z opinią publiczną.

## Wnioski

Na podstawie dostępnych danych geofizycznych z basenów sedymentacyjnych syluru w Polsce, w których mogą się znajdować złoża gazu w łupkach, stwierdzono, że ze względu na zastosowanie zaawansowanej interpretacji geofizyki wiertniczej, jest możliwe wyznaczenie zawartości substancji organicznej, a następnie zawartości gazu w jednostce masy skały. Informacja o zawartości gazu jest warunkiem obliczenia zasobów, jednakże w tym celu są konieczne dodatkowe badania laboratoryjne świeżych rdzeni wiertniczych. W efekcie do obliczenia zasobów gazu jest konieczne odwiercenie nowych otworów, pobranie rdzeni i ich zbadanie przy zachowaniu surowych reżimów technologicznych.

## Literatura

- JACOBI D., GLADKIKH M., LECOPE B., HURSAN G., MENDEZ F., LONGO J., BRATOVICH M., PATTON G. & SHOERMAKER P. 2008 — Integrated petrophysical evaluation of shale gas reservoir. Society of Petroleum Engineers, 114925-MS.  
 PARKER M., BULLER D., PETRE E. & DREHER D. 2009 — Haynesville shale-petrophysical evaluation. Society of Petroleum Engineers, 122937-MS.  
 PASSEY Q.R., CREANEY S., KULLA J.B., MORETTI F.J. & STROUD J.D. 1990 — A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs. AAPG Bull., 74, 12: 1777–1794.

Praca wpłynęła do redakcji 17.02.2010 r.

Po recenzji akceptowano do druku 5.03.2010 r.