

prof. dr hab. inż. Jadwiga Jarzyna<sup>1)</sup>, dr hab. inż., prof. AGH Edyta Puskarczyk<sup>1)</sup>, dr hab. inż., prof. AGH Paulina Krakowska-Madejska<sup>1)</sup>, dr inż. Kamila Wawrzyniak-Guz<sup>1\*)</sup>

1) Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geologii Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Geofizyki,

1\*) Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geologii Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Geofizyki, do dnia 28 lutego 2022

E-mail, ORCID: [jarzyna@agh.edu.pl](mailto:jarzyna@agh.edu.pl), 0000-0002-1803-8643; [puskar@agh.edu.pl](mailto:puskar@agh.edu.pl), 0000-0001-5277-0507; [krakow@agh.edu.pl](mailto:krakow@agh.edu.pl), 0000-0002-8261-4350; [wawrzyniak.kamila@gmail.com](mailto:wawrzyniak.kamila@gmail.com), 0000-0001-6386-8171

## **Geofizyka otworowa jako przydatne narzędzie do badania własności skał w różnych zastosowaniach**

### ***Wprowadzenie***

Geofizyka otworowa/geofizyka wiertnicza jest powszechnie postrzegana jako narzędzie wykorzystywane w poszukiwaniu węglowodorów. Przytoczona nazwa niejako samorzutnie definiuje obszar wykorzystania wyników. Prawdą jest, że ta część geofizyki stosowanej rozwinęła się pod względem aparaturowym i metodycznym dzięki wysokim nakładom świadczonym przez koncerny poszukiwawcze na całym świecie. Warto jednak podkreślić, że wielkości, które mogą być zmierzone wzdłuż osi odwiertu w warunkach naturalnych i wyinterpretowane przez specjalistów z zakresu geofizyki otworowej - petrofizyków mogą być także wykorzystane w innych naukach o Ziemi: hydrogeologii, geotermii, geotechnice.

Wyniki kompleksowej interpretacji profilowań geofizyki otworowej najczęściej skupiają się na przedstawieniu na każdej głębokości profilu otworu składu mineralnego/litologicznego, porowatości i nasycenia przestrzeni porowej. Jednak, nowoczesne sondy pozwalają także na pozyskanie dodatkowych wielkości charakteryzujących formacje skalne. Dzięki poszerzonemu zbiorowi wyników pomiarów możliwe jest także dokładniejsze rozwiązanie litologiczne. Brak zainteresowania parametrami dostarczonymi przez geofizykę otworową może wynikać także z innego definiowania tych samych parametrów w różnych dyscyplinach. Dobrym przykładem jest tutaj porowatość, która jest definiowana jako ogólna/całkowita, efektywna/odkryta, dynamiczna, a także przepuszczalność, która np. w hydrogeologii jest przedstawiana jako współczynnik filtracji.

Celem pracy jest zwrócenie uwagi na różnorodne możliwości wykorzystania profilowań geofizyki otworowej i podkreślenie zastosowania parametrów petrofizycznych w nietypowych zastosowaniach. Praca jest podzielona na dwie części: w pierwszej zwracamy uwagę na wykorzystanie standardowych profilowań, których ogromna ilość jest zgromadzona w archiwach Państwowego Instytutu Geologicznego-Państwowego Instytutu Badawczego, Polskiego Górnictwa Naftowego i Gazownictwa S.A., w archiwach Skarbu Państwa (najstarsze pomiary) oraz archiwach instytucji inwestujących w odwiertanie otworów. W drugiej prezentujemy nowoczesne sondy pomiarowe i wyniki, których dostarczają w kontekście nietypowych zastosowań. Pokazujemy także możliwość kalibracji pośrednich wyników geofizyki otworowej poprzez rezultaty bezpośrednich badań

laboratoryjnych na próbkach skał. Na koniec zwracamy uwagę, na połączenie danych z geofizycznych metod otworowych i powierzchniowych. Cytowane publikacje są źródłem dodatkowych informacji, a prace, na które powołują się autorzy przytaczanych artykułów pozwalają na zgłębienie szczegółów dotyczących pomiarów i metodyk interpretacyjnych. Referat na posiedzeniu KNG PAN Oddział w Krakowie i publikowane streszczenie mają charakter popularyzatorski, dlatego w spisie literatury znalazły się prace autorek, które od lat starają się promować dyscyplinę i specjalność, w której pracują.

### **Wykorzystanie dostępnych danych archiwalnych**

Tradycyjne zestawy pomiarowe geofizyki otworowej powszechnie stosowane w poszukiwaniach naftowych – *Triple Combo/Quad Combo* zawierają profilowania oporności (różnego typu w zależności od warunków geologicznych i stanu posiadania firmy serwisowej – najstarsze, klasyczne - potencjałowe i gradientowe lub laterologi - LL3, LLD, LLS, MSFL oraz sondy indukcyjne, ILD, ILS, HRAI) wraz z profilowaniem potencjałów polaryzacji naturalnej - PS, profilowania radiometryczne obejmujące pomiar naturalnej promieniotwórczości - GR, profilowania neutronowe - NPHI i gęstościowe - RHOB oraz profilowanie akustyczne - DT (Zorski i in, 2013 i 2013a). Podstawowe zadania geofizyki otworowej w poszukiwaniu i udostępnianiu złóż węglowodorów sprowadzają się do ogólnej charakterystyki strukturalnej, litologicznej i sedimentologicznej i pozwalają ocenić badany basen osadowy z punktu widzenia występowania skał macierzystych i zbiornikowych zapewniających warunki generowania i akumulacji węglowodorów. Wspomniane wcześniej wielkości: objętości składników mineralnych, w tym zailenia rozumianego jako objętościowa zawartość minerałów ilastych, zdecydowanie ograniczającego porowatość i przepuszczalność, mogą być użyteczne w zastosowaniach hydrogeologicznych (Jarzyna i in., 2018) i geotermalnych (Jarzyna i in. 2021), gdzie parametry zbiornikowe odgrywają bardzo ważną rolę. Wyniki spektrometrycznego profilowania gamma w postaci krzywych zawartości potasu, uranu i toru wraz z profilowaniem gęstościowym pozwalają na wyznaczenie ciepła radiogenicznego wzdłuż profilu otworu, które można wykorzystać do modelowania powierzchniowego strumienia ciepła. Takie wyniki mogą być przydatne w nowoczesnej geotermii dla oceny wydajności stanowisk pomp ciepła (Janowski, 2007). Warto także przypomnieć profilowanie upadu warstw - PUW, które jest od dawna wykonywane w otworach. Wyinterpretowane na podstawie zapisu sześciu mikroprofilowań oporności kąty upadu i azymuty biegu warstw dają szansę na wyznaczenie rzeczywistej miąższości poziomów, co pozwala na realistyczną ocenę zasobów nie tylko węglowodorów, ale także wody pitnej i geotermalnej (Stadtmüller i in., 2022).

### **Nowoczesne profilowania otworowe**

Profilowania akustyczne ze źródłami dipolowymi, znane jako wieloodbiornikowe skanery akustyczne pozwalają na wyznaczenie prędkości fal podłużnych i poprzecznych, a razem z gęstością objętościową, RHOB dynamicznych parametrów sprężystych w warunkach *in situ*. Dostarczają obraz o wysokiej rozdzielczości sprężystych własności skał na ścianie otworu, pokazują kształt i rozmiar otworu oraz kierunki o zróżnicowanym naprężeniu w górotworze. Wskazują także anizotropię własności sprężystych formacji skalnej. Korelacja wyników wytrzymałościowych badań laboratoryjnych na próbkach skalnych daje wiarygodne równania przeliczeniowe sprężystych parametrów dynamicznych na statyczne, które z kolei są wykorzystywane w normach i innych regulacjach dotyczących budownictwa (Puskarczyk i in., 2017).

Laboratoryjne pomiary oraz otworowe profilowania wykorzystujące zjawisko magnetycznego rezonansu jądrowego (*Nuclear Magnetic Resonance - NMR*) pozwalają uniezależnić porowatość, zwykle wyznaczaną z tzw. 3. profilowań porowatości: NPHI, RHOB i DT, wchodzących w skład podstawowego zestawu pomiarowego, od wpływu szkieletu mineralnego, wyznaczyć zawartość wody związanej w górotworze i wyjaśnić

różnicę między porowatością efektywną a dynamiczną, a także dodać kolejną metodę wyznaczania przepuszczalności (Jarzyna i in., 2015; Jarzyna i in., 2017).

Nowoczesnym skanerem elektrycznym, czyli sondą do opornościowego obrazowania ścianki otworu jest XRMI (*X-tended Range Micro Imager*, Halliburton) (Pasek, 2010). Sonda ta wraz z dostosowanym oprogramowaniem pozwala na uzyskanie obrazu ścian otworu w przekrojach piaszczysto-ilastych i węglanowych. Na podstawie rejestrowanych mikroprofilowań oporności o pionowej rozdzielczości ok. 5 mm możliwe jest wyznaczenie kątów i azymutów zapadania warstw, przeprowadzenie analizy strukturalnej i sedymentacyjnej oraz rozpoznanie takich elementów jak fałdy czy uskoki. Zapis tą sondą umożliwia także przeprowadzenie analizy szczelinowatości (naturalnej i indukowanej) oraz wydzielenie w górotworze cienkich przewarstwień o zróżnicowanych właściwościach (Plewka i Jarzyna, 2017).

Spektrometryczne profilowanie neutron-gamma, wykonywane tzw. sondą geochemiczną (np. GEM, Halliburton czy ECTS, Schlumberger) pozwala wyznaczyć zawartość kilkunastu pierwiastków w formacji skalnej. Koncentracje pierwiastków są podstawą do określenia typu litologicznego, a nawet szczegółowego składu mineralnego. Dzięki pomiarowi węgla całkowitego możliwe jest bezpośrednie wyznaczenie węgla organicznego (*Total Organic Carbon*, TOC) oraz rozróżnienie węglanu wapnia i dolomitu (Zorski i in., 2013).

### **Wykorzystanie wyników badań laboratoryjnych – kalibracja**

Warto jeszcze zwrócić uwagę na specyficzną cechę profilowań geofizyki otworowej, czyli dużą liczbę danych w postaci gęsto, zarazem równomiernie spróbkowanych zbiorów. Stanowią one znakomity materiał do analiz statystycznych (Puskarczyk, 2020) oraz korelacji wyników bezpośrednich badań laboratoryjnych na próbkach skalnych pobranych z odwiertów z pośrednimi wynikami pomiarów geofizycznych. Każda z ww. grup danych ma zalety i ograniczenia. Punktowe badania laboratoryjne wymagają materiału skalnego i dostosowania warunków pomiarowych (ciśnienia i temperatury) do złożowych. Ciągłe profilowania geofizyczne *in situ* dają uśrednione wartości parametrów ze względu na budowę urządzeń pomiarowych. Jednak metody statystyczne i modelowania matematyczne dostarczają rozwiązań, które pozwalają na połączenie obu zbiorów i uzyskanie najbardziej wiarygodnej relacji. Bardzo trudnym zadaniem, ze względu na małe próbki wykorzystywane w nowoczesnych badaniach mikrotomograficznych, jest włączenie tych szczegółowych wyników do różnorodnych analiz (Krakowska i in., 2021).

### **Współpraca z innymi metodami**

Ważnym aspektem wykorzystania wyników profilowań geofizyki otworowej jest współpraca z sejsmiką. Tworzenie modeli prędkościowych dla sejsmiki jest obszarem, w którym profilowanie akustyczne jest wykorzystywane od początków swojego istnienia (Wawrzyniak-Guz i in., 2021). Profilowania akustyczne z wykorzystaniem nowoczesnych sond typu *Ultrasonic Borehole Imager* – UBI czy *Dipol Shear Borehole Imager*, wyposażonych w źródła dipolowe umożliwiają tworzenie modeli nie tylko dla fali P, również dla fali S, czego wymaga interpretacja nowoczesnej sejsmiki. Podobnie, profilowania oporności w głębokich otworach (zarówno te archiwalne, jak i najnowsze, dające krzywe oporności rzeczywistych) mogą przyczynić się do udokładnienia wyników badań magnetotellurycznych. Zastosowanie metod *Machine Learning* pozwala na efektywne wykorzystanie także innych profilowań do ww. celów. Wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych lub innych metod z grupy *Machine Learning* razem z wynikami profilowań o bardzo dużej pionowej rozdzielczości (np. PUW, XRMI – ok. 0.5 cm) jest sposobem na podniesienie dokładności interpretacji z użyciem podstawowych profilowań o rozdzielczości standardowej (ok. 50 cm) dzięki modelowaniu udoskonalonych profilowań (Lis-Śledziona, 2021).

## Literatura

Janowski M., 2007 - Heating pump as ecologic heat source? GLOBEnergia 2007, 3, s. 28; ISSN 1897-1288. Ogólnopolski Kongres Geotermalny „Geotermia w Polsce – doświadczenia, stan aktualny, perspektywy rozwoju”, Radziejowice, 17–19 . 10. 2007, Abstracts - Polskie Stowarzyszenie Geotermiczne GEOSYSTEM, Krakow cooperating with AGH UST, Krakow, Poland and Stowarzyszenie Geosynoptyków GEOS

Jarzyna J., Baudzis S., Janowski J., Puskarczyk E., 2021 - Geothermal resources recognition and characterization on the basis of well logging and petrophysical laboratory data, Polish case studies. Energies, vol. 14, iss. 4, art. no. 850, s. 1–26; ISSN 1996-1073

Jarzyna J., Maziarka D., Pasek P., Klaja J., Krakowska P., Puskarczyk E., 2017 - Profilowanie otworowe z wykorzystaniem zjawiska magnetycznego rezonansu jądrowego i badania NMR na próbkach skalnych dla oceny skał zbiornikowych. Przegląd Geologiczny, t. 65, nr 2, s. 109–121; ISSN 0033-2151

Jarzyna J., Puskarczyk E., Ogórek E., Motyka J., 2018 - Wyznaczanie porowatości ogólnej i parametrów szkieletowych utworów węglanowych na podstawie pomiarów prędkości fal sprężystych i gęstości. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, Warszawa, nr 473, s. 13–25; ISSN 0867-6143

Jarzyna J.A., Krakowska P.I., Puskarczyk E., Semyrka R., 2015 - Rock reservoir properties from the comprehensive interpretation of nuclear magnetic resonance and mercury injection porosimetry laboratory results. Applied Magnetic Resonance, vol. 46 iss. 1, 95–115; ISSN 0937-9347

Krakowska-Madejska P., Puskarczyk E., Habrat M., Madejski P., Dohnalik M., Jędrychowski M., 2021 - Development of a permeability formula for tight and shale gas reservoirs based on advanced high-precision lab measurement techniques. Energies, vol. 14, iss. 9 art. no. 2628, 1-25; ISSN 1996-1073

Lis-Śledziona A., 2021 - Multiscale evaluation of thin-bed reservoir. Geology Geophysics & Environment, vol. 47 (1), str. 5-20

Pasek P., 2010 - Rozpoznanie ośrodka skalnego na podstawie pomiarów skanerem elektrycznym XRMI. Geopetrol 2010: Nowe metody i technologie zagospodarowania złóż i wydobycia węglowodorów w warunkach lądowych i morskich. Międzynarodowa konferencja naukowo-techniczna. Zakopane, 20--23.09.2010. Prace Naukowe INiG, 2010, tom 170, str. 615-619

Plewka T., Jarzyna J., 2017 - Przetwarzanie i interpretacja pomiarów elektrycznego obrazowania ściany otworu w utworach klastyczno-węglanowych pod kątem wyznaczania struktur. Nafta Gaz, R. 73 nr 1, s. 14–26; ISSN 0867-8871

Puskarczyk E., 2020 - Application of multivariate statistical methods and artificial neural network for facies analysis from well logs data: an example of Miocene deposits. Energies, vol. 13, iss. 7 art. no. 1548, s. 1–18; ISSN 1996-1073

Puskarczyk E., Krakowska P., Wawrzyniak-Guz K., Jarzyna J., 2017 - Badania prędkości fal sprężystych i charakterystyka naprężeniowo-odkształceniowa w warunkach trójosiowego ściskania dla wybranych skał klastycznych i węglanowych. Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, nr 101, s. 313–322; ISSN 2080-0819

Stadtmüller M., Lis-Śledziona A., Krakowska-Madejska P., Jarzyna J., 2022 - Charakterystyka jednostek geologicznych na podstawie geofizyki wiertniczej i danych

geologicznych, przykłady z jednostki śląskiej, z polskich Karpat Zewnętrznych. Materiały Konferencyjne Konferencji Geopetrol 2022, Zakopane 19-21 września, 2022

Wawrzyniak-Guz K., Jarzyna J.A., Pieniądz K., Starzec K., 2021 - Multiple regression and modified Faust equation on well logging data in application to seismic procedures: Polish Outer Carpathians case study. *Energies*, vol. 14 iss. 19, pp. 26–27, art. no. 6300, s. 1–27 ISSN 1996-1073

Zorski T., Jarzyna J., Derkowski A., Środoń J., 2013 - Geofizyka otworowa w dobie poszukiwań gazu w łupkach – przegląd metod pomiarowych. *Przegląd Geologiczny*, t. 61, nr 7, s. 424–434; ISSN 0033-2151

Zorski T., Jarzyna J., Derkowski A., Środoń J., 2013a - Geofizyka otworowa w dobie poszukiwań gazu w łupkach – modele interpretacyjne i specyfika zastosowań w zagadnieniach rozpoznawania złóż gazu z łupków. *Przegląd Geologiczny*, t. 61, nr 8, s. 478–488; ISSN 0033-2151