

Irena Gašior

Institut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

Beata Reicher

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska

Estymacja czasu interwałowego z profilowań geofizyki otworowej metodą sieci neuronowych

Celem pracy jest wykorzystanie metody sieci neuronowych do określenia czasów interwałowych ΔT , niezbędnych do ilościowej oceny zawartości węgla organicznego (TOC % wag.) metodą CARBOLOG. Technika ta wymaga zastosowania dwóch podstawowych profilowań geofizycznych: oporności i akustycznego. Przegląd archiwalnych profilowań geofizycznych w odwiertach poszukiwawczych przemysłu naftowego i wierceniach badawczych Państwowego Instytutu Geologicznego z obszaru platformy prekambryjskiej wykazał duże zróżnicowanie ich jakości. W licznych otworach wiertniczych profilowania te nie zostały wykonane lub nie zachowały się. Z wytypowanych ostatecznie 10 odwiertów w sześciu nie wykonano profilowania akustycznego, a do estymacji czasu interwałowego wykorzystano sieci neuronowe. Przetestowano wiele typów sieci, dla różnych zmiennych wejściowych. Uzyskano wysokie współczynniki korelacji ($R: 0,76\div 0,97$) pomiędzy wartościami czasu interwałowego otrzymanego metodą sieci neuronowych i z profilowania akustycznego. Potwierdzono tym samym poprawność metody estymowania czasu interwałowego z wykorzystaniem sieci neuronowych. Technikę tę można zastosować w odwiertach o podobnym profilu stratygraficznym, nawet w skali całych basenów.

Słowa kluczowe: TOC, CARBOLOG, sieci neuronowe, starszy paleozoik.

Estimation of interval times from geophysical logs with the use of the neural network method

The goal of this paper is to present the use of the neural network method to estimate interval times ΔT . Interval times ΔT are essential for quantitative estimation of TOC with the use of the Carblog method. This method requires the application of two basic geophysical logs: electrical and acoustic resistance. A review of archival geophysical logs in exploratory boreholes in the oil industry and research boreholes of the National Geological Institute in the Precambrian platform showed great diversity in their quality. In numerous boreholes the logs were not performed or were not preserved. Out of the ten boreholes eventually selected, acoustic log was not performed in six and for the assessment of the interval time the method of neural network was applied. Many types of networks were tested, for various input variables. High values of correlation coefficient were obtained ($R: 0.76\div 0.97$) between the values of the acoustic time received by the method of neural network and the acoustic log. Thus, the correctness of the method of the acoustic log with the use of neural network was confirmed. The technique of neural network may be used in boreholes with a similar stratigraphic profile, even with respect to entire basins.

Key words: TOC (Total Organic Carbon), CARBOLOG method, neural networks, Lower Paleozoic.

Wprowadzenie

Metody oceny potencjału naftowego formacji osadowych opierają się na technikach analitycznych i interpretacyjnych, zmierzających do ustalenia prawidłowości pomiędzy ewolucją basenów sedymentacyjnych a procesami formo-

wania się złóż ropo- i gazonośnych. Powiązania wyników są rozwijane zarówno w kierunku rekonstrukcji pierwotnej geometrii basenów, jak i stymulacji procesów przeobrażania substancji organicznej w węglowodory. W tym ostatnim aspekcie punktem wyjścia dla rekonstrukcji cyklu naftowego jest określenie ilościowej zawartości substancji organicznej (utożsamianej z zawartością węgla organicznego TOC), potencjalnie macierzystej dla generowania węglowodorów. Wskaźnik ten oznaczany jest metodami laboratoryjnymi na próbkach skał. Niemniej jednak wyniki oznaczeń obejmują zwykle zbiór kilkudziesięciu wartości, obiektywnie ograniczony zakresem rdzeniowania i systemem poboru próbek okruchowych. Interpolacja tych wartości na całość badanego profilu lub ich uśrednianie niesie ze sobą duże ryzyko, związane zwykle z nierównomierną koncentracją substancji organicznej w skałach osadowych. Dlatego ważne jest wykorzystanie metod geofizyki wiertniczej, które umożliwiają ciągle zapis zmian potencjału macierzystości w całym profilu otworu wiertniczego.

Najczęściej stosowanymi metodami do określenia zawartości substancji organicznej na podstawie danych otworowych są techniki: Passey [4, 5, 11] i CARBOLOG [1, 2, 12].

Metoda CARBOLOG rozwinięta we francuskim Instytucie Naftowym [1] służy do ilościowej oceny zawartości substancji organicznej TOC na podstawie analizy jedynie dwóch profilowań geofizycznych: akustycznego i oporności.

Metodę CARBOLOG od lat wykorzystuje się w Instytucie Nafty i Gazu – Państwowym Instytucie Badawczym [2]. W Zakładzie Geofizyki Wiertniczej Instytutu opracowano program CARBOLOG, który pozwala w sposób ciągły otrzymywać zawartość węgla organicznego w profilu otworu wiertniczego.

Profilowania geofizyczne

Niezbędnymi danymi w metodzie CARBOLOG, dla określenia zawartości węgla organicznego TOC, są profilowania akustyczne i oporności elektrycznej. Interpretowane otwory były wiercone w dużym przedziale czasowym (począwszy od roku 1968 (Ł-8) do 1999 (L-1)), różne było ich przeznaczenie i obsługiwane były przez zmieniającą się z czasem grupę geologów i geofizyków o odmiennym podejściu metodycznym. Jest to powodem wykonania niespójnego podziału stratygraficznego i opisów geologicznych. Materiał geofizyczny z tych otworów był bardzo zróżnicowany pod względem jakości. Jedynie w odwiertach: L-1, M_IG-1, S-2 oraz w części profilu T-2 wykonano pomiary sondami firmy Halliburton. Brak profilowania akustycznego lub jego wykonanie w ograniczonym interwale głębokościowym, uniemożliwiało ocenę zawartości węgla organicznego. W profilach badanych otworów wiertni-

Przegląd istniejących profilowań geofizyki otworowej w połączeniu z wynikami badań analitycznych próbek skał metodą Rock-Eval w odwiertach poszukiwawczych jednostek przemysłu naftowego i wierceniach badawczych Państwowego Instytutu Geologicznego wykazał duże zróżnicowanie jakości profilowań geofizycznych, niezbędnych do zastosowania metody CARBOLOG. Niekiedy brak wyników pomiarów zawartości TOC na próbkach skał utrudnił wybór wierceń do przeprowadzenia analizy. Profilowania geofizyki otworowej zostały udostępnione przez PGNiG SA w Warszawie, a wyniki pomiarów laboratoryjnych zawartości TOC zestawiono z publikowanymi [10, 13] oraz archiwalnych projektach AGH w Krakowie i PIG – PIB w Warszawie, w ramach realizacji Projektu Rozwojowego nr N R09 0004 06.

Dwa podstawowe profilowania: oporności i akustyczne, niezbędne dla wykonania obliczeń parametru TOC, nie zostały zrealizowane lub przeprowadzono je w ograniczonym zakresie. Z wytypowanych ostatecznie do analizy 10 odwiertów jedynie w L-1, M_IG-1, S-2 oraz w części profilu wiercenia T-2 wykonano pomiary sondami firmy Halliburton, przy czym w odwiertach L-1 i S-2 nie zrealizowano pomiarów zawartości węgla TOC. W pozostałych odwiertach w większości wykonywane były profilowania oporności różnymi sondami.

Drugim niezbędnym profilowaniem w metodzie CARBOLOG jest profilowanie akustyczne, które nie było przeprowadzone w sześciu z wybranych otworów wiertniczych. Należały do nich: K_IG-1, Ł-8, Ł_IG-1, S_IG-1, S_IG-1 oraz Ż_IG-1. Stąd, aby wykonać ilościową ocenę zawartości węgla organicznego TOC, do estymacji czasu interwałowego w profilach wymienionych odwiertów wykorzystano metodę symulacji sieci neuronowych.

czych w większości wykonywane były profilowania oporności różnymi sondami. Były to:

- LL3 – sterowane profilowanie oporności o płytkim zasięgu,
- LLD – sterowane profilowanie oporności o głębokim zasięgu,
- EI03 – gradientowe profilowanie oporności (dł. sondy – 1,05 m),
- EI09 – gradientowe profilowanie oporności (dł. sondy – 2,625 m),
- EI28 – gradientowe profilowanie oporności (dł. sondy – 8,5 m).

Aby określić zawartość węgla organicznego w badanych otworach, niejednokrotnie w profilu danego otworu należy korzystać z kilku profilowań oporności wykonanych różnymi sondami.

Drugim niezbędnym profilowaniem w metodzie CARBOLOG jest profilowanie akustyczne, które nie zostało wykonane w sześciu z wybranych otworów wiertniczych. Należały do nich: K_IG-1, Ł-8, Ł_IG-1, Sł_IG-1, S_IG-1

oraz Ż_IG-1. Stąd, aby wykonać w niniejszej pracy ilościową ocenę zawartości węgla organicznego TOC, do estymacji czasu interwałowego w profilach wymienionych odwiertów wykorzystano sieci neuronowe.

Wykorzystanie sieci neuronowych do estymacji czasu interwałowego

Sieci neuronowe są coraz częściej stosowane w rozwiązywaniu szeregu problemów w dziedzinie geologii i geofizyki [3, 6, 7, 8, 9]. Technika modelowania sieciami neuronowymi umożliwia tworzenie modeli, a także kontrolę nad złożonym problemem wielowymiarowości, który przy zastosowaniu innych metod może utrudniać próbę modelowania funkcji nieliniowych z dużą liczbą zmiennych niezależnych.

W opracowaniu tym do symulacji sztucznych sieci neuronowych wykorzystano program STATISTICA Neural Networks (SNN). Podstawowym źródłem wiedzy dla sieci neuronowych jest baza danych obejmująca przykłady zmiennych wejściowych i poprawnych rozwiązań.

Bazę danych wejściowych stanowiły:

- profilowanie gamma (PG),
- porowatość neutronowa w skali wapienia, poprawiona na wpływ otworu wiertniczego (średnicę i gęstość płuczki wiertniczej) (NPHI),
- profilowanie oporności (PO).

Opracowano sieci neuronowe w otworach wiertniczych, w których wykonane było profilowanie akustyczne PAdt w całym profilu lub w jego części. Były to następujące odwierty: L-1, M_IG-1, S-2, Ł_IG-1 oraz T-2. Przetestowano wiele typów sieci dla różnych zmiennych wejściowych, porównując ich skuteczność. Najlepsze z nich były sieci o radialnych funkcjach bazowych (RBF).

Otwór wiertniczy L-1

W tabelicy 1 przedstawiono wyniki testowania sieci neuronowych dla dwu i trzech zmiennych wejściowych. Zestawione w tabeli współczynniki korelacji R dla całego kompletu danych oraz z uwzględnieniem jego podziału na zbiory: uczący, walidacyjny i testujący – są wskaźnikami poprawnego działania metody.

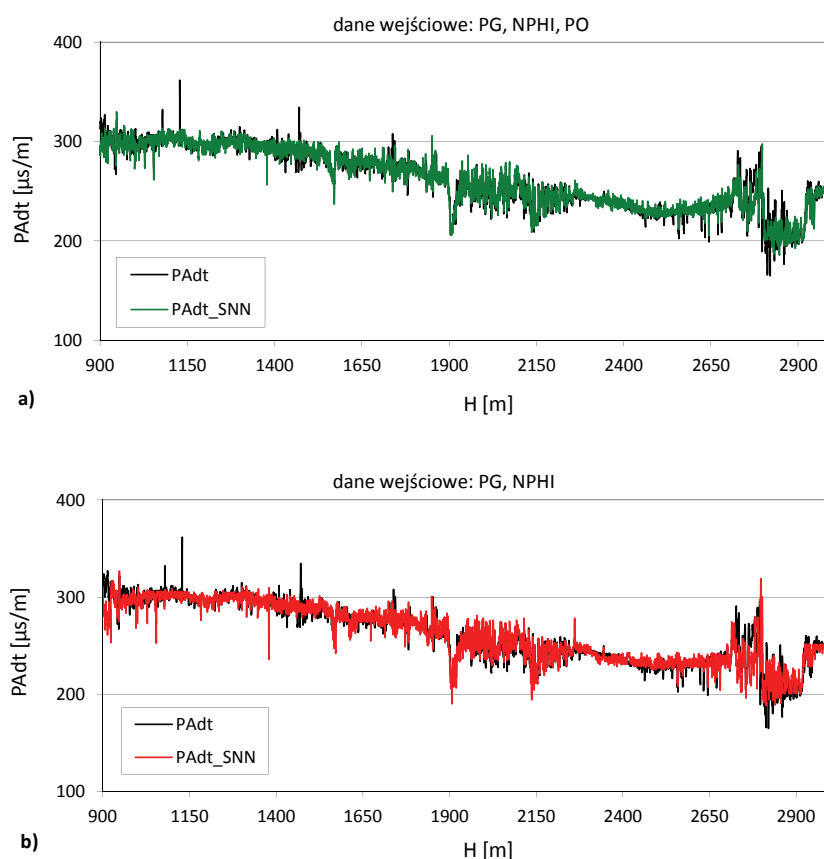
Na rysunkach 1 i 2 zestawiono czasy interwałowe PAdt określone ww. sposobami oraz ich korelacje.

Z powyższej analizy wynika, że opracowane sieci neuronowe typu RBF poprawnie estymują czas interwałowy przy PA. Współczynnik korelacji równy jest odpowiednio 0,97

Tablica 1. Wyniki estymacji czasu interwałowego (PAdt) przy pomocy sieci neuronowych w otworze wiertniczym L-1

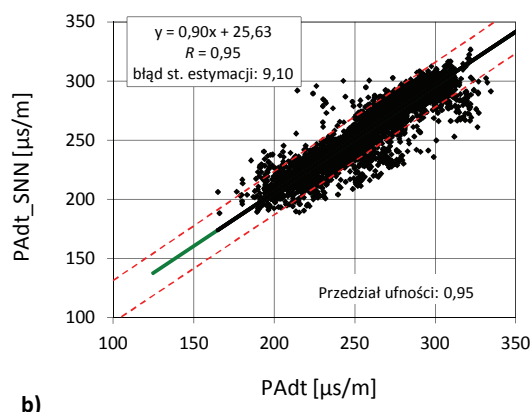
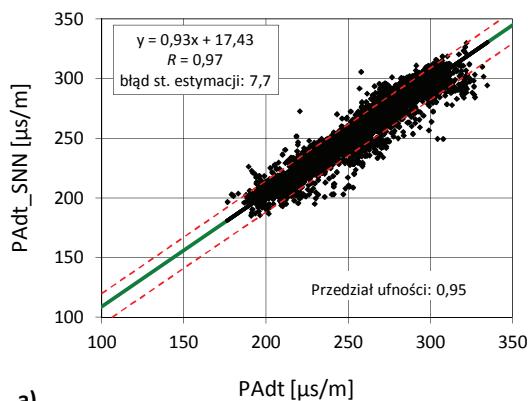
Typ sieci	Współczynnik korelacji R			
	Zbiór uczący	Zbiór walidacyjny	Zbiór testujący	Razem
Dane wejściowe: PG, NPHI, PO				
RBF*	0,97	0,96	0,96	0,97
Dane wejściowe: PG, NPHI				
RBF	0,95	0,94	0,95	0,95

*Sieci neuronowe o radialnych funkcjach bazowych.



Rys. 1. Zestawienie czasów interwałowych uzyskanych z profilowania akustycznego (PAdt) i metodą sieci neuronowych (PAdt_SNN) dla różnych zmiennych wejściowych w otworze wiertniczym L-1

oraz 0,95 dla trzech i dwóch zmiennych wejściowych. Uzyskane trendy zmienności czasów interwałowych są ze sobą na ogół zgodne. Czas interwałowy estymowany metodą SNN (PAdt_SNN) charakteryzuje się nieco mniejszym zakresem



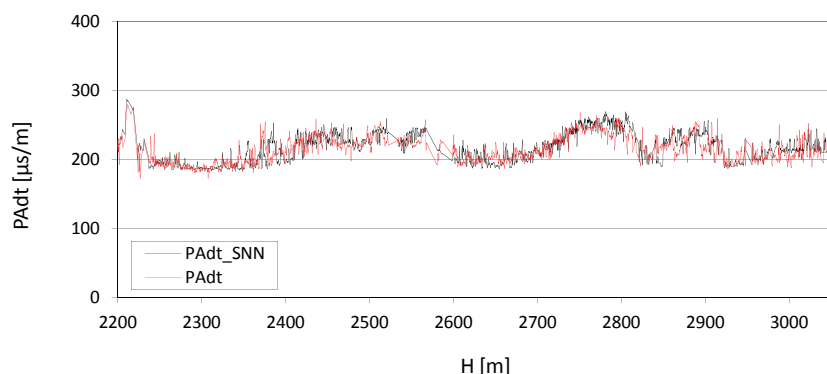
Rys. 2. Korelacja czasów interwałowych uzyskanych z profilowania akustycznego PAdt i metodą sieci neuronowych (PAdt_SNN) dla różnych zmiennych wejściowych w otworze wiertniczym L-1

zmienności w porównaniu z czasem interwałowym z profilowania akustycznego PAdt.

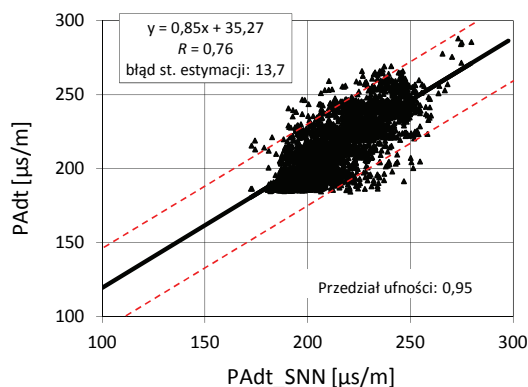
Skonstruowaną i nauczoną sieć neuronową typu RBF dla zmiennych wejściowych PG oraz NPHI w otworze L-1 wykorzystano do określenia czasu interwałowego w odwiercie S-2 leżącym w basenie lubelskim. W obu tych otworach pomiary wykonywane były sondami firmy Halliburton. Otrzymane rezultaty przedstawiono na rysunkach 3 i 4.

Tablica 2. Zakresy zmian i średnie wartości czasów interwałowych uzyskanych różnymi metodami w otworze wiertniczym L-1

Parametr	Zakres zmian	Wartość średnia
Dane wejściowe: PG, NPHI, PO		
PAdt [$\mu\text{s}/\text{m}$]	164,8÷361,7	260,6
PAdt_SNN [$\mu\text{s}/\text{m}$]	185,4÷330,0	260,7
Dane wejściowe: PG, NPHI		
PAdt_SNN [$\mu\text{s}/\text{m}$]	188,4÷321,1	260,6



Rys. 3. Zestawienie czasów interwałowych określonych metodą sieci neuronowej (PAdt_SNN) skonstruowanej dla otworu L-1 z czasem interwałowym z profilowania akustycznego (PAdt) w odwiercie S-2



Rys. 4. Korelacja czasów interwałowych uzyskanych różnymi sposobami w otworze wiertniczym S-2

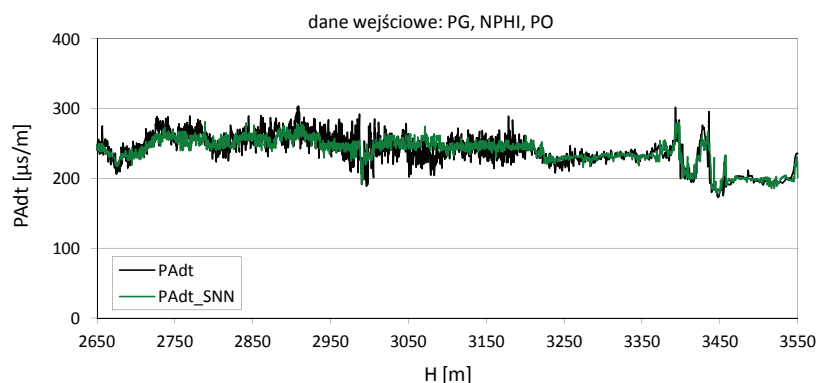
Otwór wiertniczy T-2

W tablicy 3 i na rysunkach 5 i 6 zestawiono wyniki estymacji czasu interwałowego przy wykorzystaniu metody sieci neuronowych.

Wartości czasu interwałowego uzyskanego metodą sieci neuronowych charakteryzuje się nieco mniejszym zakresem zmienności w porównaniu z czasem interwałowym z profilowania akustycznego (PAdt_SNN: 178,7÷281,3 $\mu\text{s}/\text{m}$, śr. PAdt_SNN = 238,4 $\mu\text{s}/\text{m}$; PAdt: 172,8÷303,6 $\mu\text{s}/\text{m}$, śr. PAdt = 238,7 $\mu\text{s}/\text{m}$). Współczynnik korelacji pomiędzy nimi równy jest 0,85. Uzyskane trendy zmienności czasów interwałowych są ze sobą na ogół zgodne.

Tablica 3. Wyniki estymacji czasu interwałowego (PAdt) przy pomocy sieci neuronowych w otworze wiertniczym T-2

Typ sieci	Współczynnik korelacji R			
	Zbiór uczący	Zbiór walidacyjny	Zbiór testujący	Razem
Dane wejściowe: PG, NPHI, PO				
RBF	0,85	0,84	0,85	0,85
Dane wejściowe: PG, NPHI				
RBF	0,85	0,82	0,77	0,82



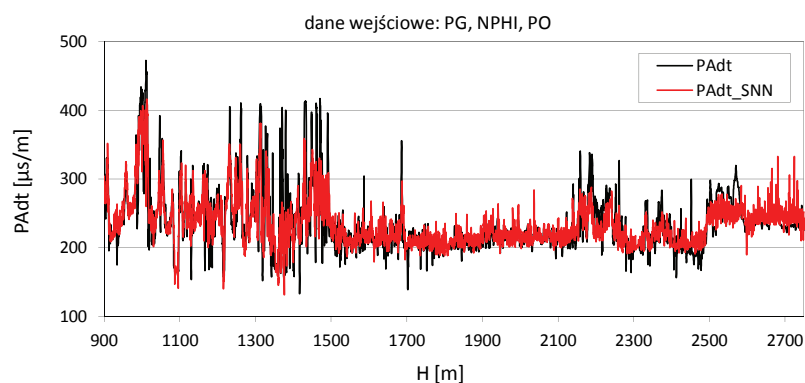
Rys. 5. Zestawienie czasów interwałowych pozyskanych z profilowania akustycznego (PAdt) i metodą symulacji sieci neuronowych typu RBF dla trzech zmiennych wejściowych (PAdt_SNN)

Otwór wiertniczy Ł_IG-1

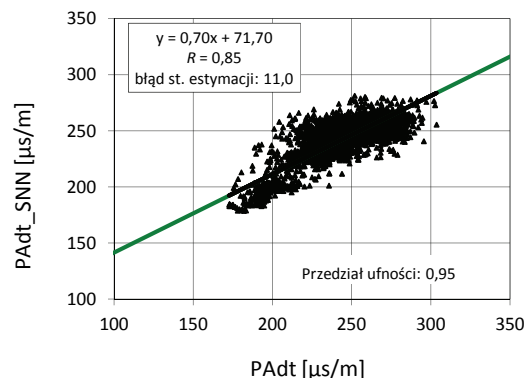
Najlepszą ze skonstruowanych sieci neuronowych okazała się być sieć typu RBF o współczynniku korelacji równym 0,78 dla całego zbioru danych (rysunki 7 i 8).

Najlepsze sieci neuronowe opracowane dla odwiertu L-1

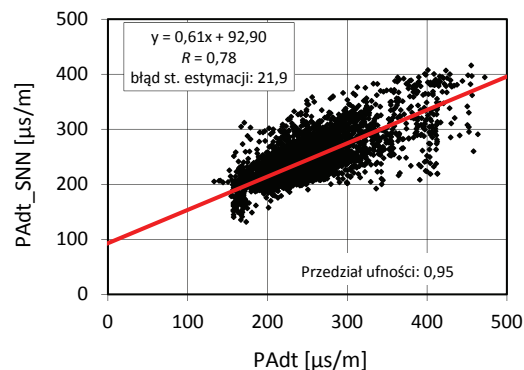
zostaną wykorzystane do estymacji czasu interwałowego w otworach wiertniczych: K_IG-1, Ł-8, Sł_IG-1 oraz Ż_IG-1, zaś sieci skonstruowane dla otworu T-2 zastosowane do określenia czasu interwałowego w odwiercie S_IG-1.



Rys. 7. Zestawienie czasów interwałowych uzyskanych z profilowania akustycznego (PAdt) i metodą symulacji sieci neuronowych (PAdt_SNN) w otworze wiertniczym Ł_IG-1



Rys. 6. Korelacja czasów interwałowych pozyskanych z profilowania akustycznego PAdt i metodą symulacji sieci neuronowych (PAdt_SNN) w otworze wiertniczym T-2



Rys. 8. Korelacja czasów interwałowych uzyskanych z profilowania akustycznego PAdt i metodą sieci neuronowych w otworze wiertniczym Ł_IG-1

Wnioski

Materiał geofizyczny pochodzący z 10 wytypowanych odwiertów był bardzo zróżnicowany pod względem jakości. Niedogodnością okazał się brak profilowania akustycznego w sześciu z wybranych otworów wiertniczych, a także różnorodność profilowań oporności w profilu danego otworu.

Do estymacji czasu interwałowego w profilach odwiertów, w których profilowanie akustyczne nie było wykonywane, wykorzystano metodę sieci neuronowych. Przetestowano wiele typów sieci, dla różnych zmiennych wejściowych, które stanowiły dane otworowe. Uzyskano wysokie wartości współczynników korelacji pomiędzy wartościami czasu interwałowego otrzymanego metodą sieci neuronowych i z profilowania akustycznego ($R: 0,76 \div 0,97$).

Przedstawione wyniki pracy pokazują możliwość wykorzystania archiwalnych (gorszych jakościowo, a nawet niekompletnych) profilowań do oceny zawartości parametru TOC. Zaprezentowana metoda interpretacji danych geofizyki otworowej umożliwi ocenę tego parametru w profilu otworu, w którym wykonano pomiary geofizyczne wysokiej jakości, nie dysponując jednocześnie danymi laboratoryjnymi z pomiarów TOC. Technika sieci neuronowych pozwala na predykcję profilowania akustycznego w otworach wiertniczych (w których nie wykonano tego profilowania) o podobnym profilu stratygraficznym, nawet w skali basenów bałtyckiego i podlasko-lubelskiego, czego dobrym przykładem jest analiza przeprowadzona w otworach wiertniczych L-1 i S-2.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2014, nr 11, s. 765–770

Przedstawione badania wykonane zostały w roku 2010 w ramach Projektu Rozwojowego nr N R09 0004 06 pt. *Ocena perspektyw poszukiwawczych i wytypowanie stref z potencjalnymi pułapkami złożowymi dla ropy naftowej i gazu ziemnego formacji kambru na Niżu Polskim*, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, a realizowanego na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej we współpracy z Instytutem Nafty i Gazu – Państwowym Instytutem Badawczym w Krakowie.

Literatura

- [1] Carpentier B., Huc Y. A., Bessereau G.: *Diagraphies et roches meres estimation de teneurs en carbone organique par la methode CARBOLOG*. Revue de l'Institut Francais du Petrole 1989, vol. 44, no 6.
- [2] Ciechanowska M., Kusmirek J.: *Ocena potencjału macierzystości perspektywicznych formacji ropogazonosnych metodami geofizyki wiertniczej*. Nafta-Gaz 1992, nr 11–12, s. 260–277.
- [3] Darlak B.: *Ocena mozliwosci wprowadzenia sieci neuronowych w badaniach petrofizycznych*. Nafta-Gaz 1997, nr 7–8, s. 308–313.
- [4] Drop K., Kozłowski M.: *Rola geofizyki wiertniczej w określeniu zasobów gazu ziemnego w łupkach*. Przegląd Geologiczny 2010, vol. 58, nr 3, s. 263–265.
- [5] Dudek L., Stadtmuller M.: *Wykorzystanie modelowania 3D w programie PetroCharge do określenia zasobów ilościowych ropy naftowej i gazu ziemnego, z uwzględnieniem profilowania geofizyki wiertniczej*. Nafta-Gaz 2010, nr 11, s. 973–986.
- [6] Gasior I.: *Ocena mozliwosci stosowania metod sztucznej inteligencji do określenia parametrów zbiornikowych w utworach czerwonego spagowca*. Nafta-Gaz 2007, nr 10, s. 587–594.
- [7] Gasior I.: *Wykorzystanie sieci neuronowych oraz metod statystyki matematycznej do oceny ciepła radiogenicznego skal mezo-paleozoicznych zapadliska przedkarpacciego rejonu Tarnów–Debica*. Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu, nr 180. Kraków 2012.
- [8] Jarzyna J., Opyrchal A., Mozgowej D.: *Sztuczne sieci neuronowe dla uzupełnienia danych w geofizyce otworowej – wybrane przykłady*. Kwartalnik AGH. Geologia 2007, t. 33, zes. 4/1, s. 81–102.
- [9] Jarzyna J., Ujma M.: *Wyznaczanie przepuszczalności skal klastycznych czerwonego spagowca z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych*. Nafta-Gaz 2012, nr 2, s. 85–96.
- [10] Kosakowski P., Kotarba M. J., Wrobel M., Burzewski W.: *Petroleum prospects of Lower Paleozoic strata in the western, onshore part of the Baltic Basin*. Prace Instytutu Górnictwa Naftowego i Gazownictwa 2008, nr 150, s. 73–77.
- [11] Passey Q. R., Creaney S., Kulla B., Moretti F. J., Stroud J. D.: *Well log evaluation of organic-rich rocks*. 14th International Meeting on Organic Geochemistry. Paris 1989, abstract 75.
- [12] Sun S. Z., Sun Y., Sun C., Liu L., Dong N.: *Method of calculating total organic carbon from well logs and its application on rock's properties analysis*. GeoConvention 2013: Integration.
- [13] Wieclaw D., Kotarba M. J., Kosakowski P., Kowalski A., Grotek I.: *Habitat and hydrocarbon potential of the lower Paleozoic source rocks in the Polish part of the Baltic region*. Geol. Quart. 2010, 54 (2), s. 159–182.



Mgr Irena GAŠIOR
Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie Geofizyki Wiertniczej.
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25A
31-503 Kraków
E-mail: gasior@inig.pl



Dr inż. Beata Reicher
Adiunkt na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska.
Akademia Górniczo-Hutnicza
al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków
E-mail: reicher@agh.edu.pl