

MODELE STATYCZNE ZŁOŻA ROPY NAFTOWEJ I GAZU ZIEMNEGO GRABOWNICA

Static models of the Grabownica oil and gas field

Bartosz PAPIERNIK¹, Paweł ZWOLIŃSKI²
& Barbara CZOPEK³

^{1,3}AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska,
Katedra Surowców Energetycznych; al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków;

e-mail: papiern@geol.agh.edu.pl, bczopek@agh.edu.pl

²San Leon Energy Poland; ul. Mokotowska 1, 00-640 Warszawa;

e-mail: pzwolinski@sanleonenergy.com

Treść: Wykorzystując archiwalne dane kartograficzne, profile stratygraficzne 40 odwiertów, wyniki profilowań oporności, potencjałów polaryzacji naturalnej oraz wyniki interpretacji porowatości i zailenia, zbudowano modele strukturalno-parametryczne fałdu Grabownicy. Na ich podstawie opracowano dyskretny „model pseudofacjalny”. Modelowania przedstawiono na przykładzie modelu 3D odwzorowującego zachodnie zamknięcie fałdu. Przedyskutowano niektóre aspekty metodyczne modelowania i wiarygodność uzyskanych wyników.

Słowa kluczowe: modelowania strukturalne, modelowania parametryczne, fałd Grabownicy

Abstract: Using archival data from mapping, stratigraphy from 40 wells and resistivity and spontaneous potential logs, as well as porosity and clay content curves, the authors constructed structural-parametric models of the Grabownica Fold. On this basis, a discrete “pseudo-facies model” was developed. The modeling was exemplified by the 3D model that images the western closure of the fold. Some methodological aspects of the modeling and the reliability of results were discussed.

Key words: structural modeling, parameter modeling, Grabownica Fold

WSTĘP

Fałd Grabownicy jest położony w strefie czołowego spiętrzenia płaszczowiny śląskiej (Fig. 2A na wklejce). Rozciąga się w kierunku NW–SE na odcinku kilku – kilkunastu kilometrów w rejonie Brzozowa – Sanoka. W okresie międzywojennym w rejonie Grabownicy

prowadzono intensywne poszukiwania naftowe. Uzyskane wyniki wierceń pozwoliły sprecyzować stratygrafię oraz tektonikę jądra fałdu (Bujalski & Obtułowicz 1931, Jaskólski 1931, Obtułowicz 1933, 1936). Prace te doprowadziły do powstawania i rozbudowy w okresie międzywojennym kolejnych kopalni: Genpeg, Graby oraz Gaten. Do roku 1939 wydobycie ropy było w nich niewielkie. Zwiększenie wydajności złoża było następstwem intensywnych prac wiertniczych w latach 1940–1944 i 1948–1953. Prace te pozwoliły wydzielić w profilu dolnej kredy pięć poziomów (Wdowiarsz 1953), tworząc podstawy podziału litostratygraficznego obowiązującego do dzisiaj (Fig. 1).

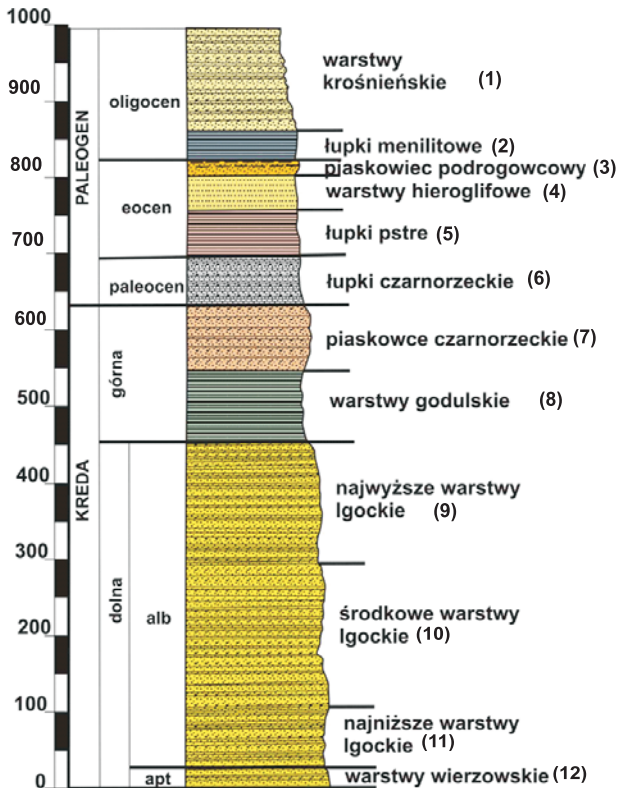


Fig. 1. Zbiorczy profil litologiczno-stratygraficzny południowo-wschodniej części fałdu Grabownicy (Zwoliński 2010, za: Wdowiarsz 1953)

Fig. 1. Composite lithologic and stratigraphic section of the southeastern part of the Grabownica Fold (Zwoliński 2010, after Wdowiarsz 1953). Explanations: 1 – Krosno Beds, 2 – Menilite Beds, 3 – Subchert Sandstone, 4 – Hieroglyphic Beds, 5 – Variegated Shales, 6 – Czarnorzeki Shales, 7 – Czarnorzeki Sandstones, 8 – Godula Beds, 9 – Upper Lgota Beds, 10 – Middle Lgota Beds, 11 – Lower Lgota Beds, 12 – Wierzowice Beds

Najnowsze prace w rejonie fałdu Grabownicy przeprowadzono w latach 2009–2010. Ich efektem była m.in. lokalna reambulacja mapy geologicznej fałdu Grabownicy (Fig. 2B) (Stefaniuk *et al.* 2010), a także gruntowna kwerenda danych w archiwach PGNiG.

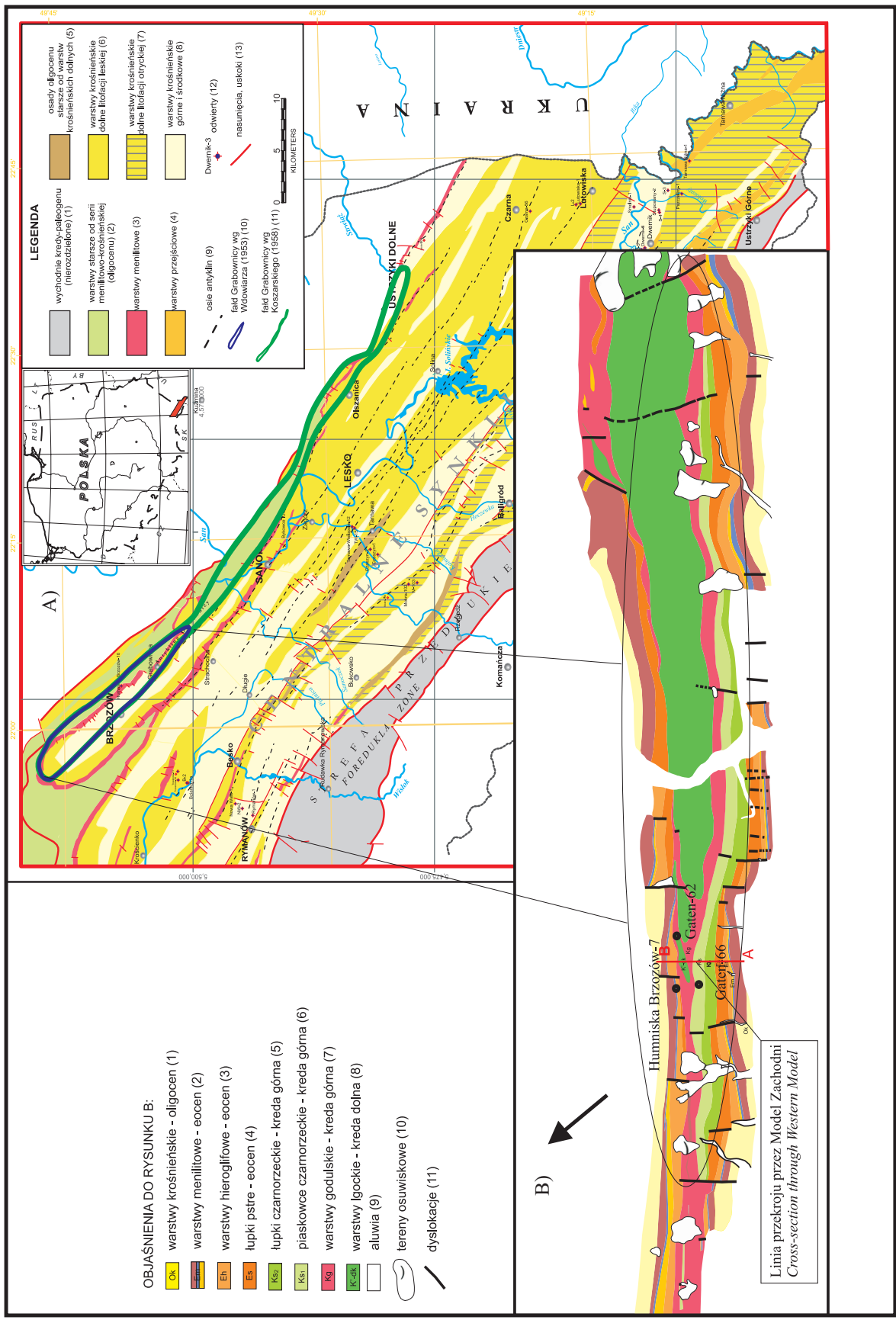


Fig. 2. Geological-structural sketch of the eastern Carpathian Synclinorium (Machowski 2010, Zwoliński 2010) (A). Fragment of the covered geological map of the southeastern part of the Grabownica Fold with marked boundary of the area subjected to modeling (after Stefaniuk *et al.* 2010) (B). Explanations of figure 1A: 1 – Cretaceous Paleogene (undivided), 2 – strata older than Oligocene-Menilite and Krosno Beds, 3 – Menilite Beds, 4 – Transitional Beds, 5 – Oligocene deposits older than the Lower Krosno Beds, 6 – Lower Krosno Beds – Lesko lithofacies, 7 – Lower Krosno Beds – Oryt lithofacies, 8 – Middle and Upper Krosno Beds, 9 – anticlines axes, 10 – Grabownica Fold (Wdowiarsz 1953), 11 – Grabownica Fold (Koszarski 1958), 12 – boreholes, 13 – thrusts, faults. Explanations of figure 2B: 1 – Krosno Beds – Oligocene, 2 – Menilite Beds – Eocene, 3 – Hieroglyphic Beds – Eocene, 4 – Variegated Shales – Eocene, 5 – Czarnorzeczi Shales – Upper Cretaceous, 6 – Czarnorzeczi Sandstones – Upper Cretaceous, 7 – Godula Beds – Upper Cretaceous, 8 – Lgota Beds – Lower Cretaceous, 9 – alluvial deposits, 10 – landslide area, 11 – faults

Kwerenda wykazała, że ilościową analizę budowy wglębnej fałdu można oprzeć przede wszystkim na licznych, ale bardzo nieprecyzyjnych profilach wierceń eksploatacyjnych znajdujących się na tym obszarze. Dane wejściowe nie obejmują w tej strefie profili sejsmicznych, co ogranicza zasadniczo wiarygodność rekonstrukcji geometrii fałdów, uskoków i nasunięć – modelu strukturalnego, a w konsekwencji także modelu parametrycznego.

Wobec braku nowych danych osnowę geometryczną modelu 3D zbudowano, wykorzystując archiwalne dane kartograficzne, głównie w postaci przekrojów, w mniejszym stopniu map strukturalnych i danych otworowych. Modele parametryczne zailenia (VCL), porowatości (PHI), oporności (RT) i potencjałów polaryzacji naturalnej (PS) policzono, wykorzystując cyfrowe wyniki profilowań geofizyki otworowej. Stosując moduł *Train Estimation Model* (TEM) programu Petrel® Schlumberger, przeprowadzono analizę podobieństwa ciągłych modeli parametrów fizycznych. Wspomagany wykorzystaniem sieci neuronowych TEM pozwolił opracować pochodne modele dyskretne, obrazujące zmienność fizyczną analizowanych utworów w podziale na pięć klas skał cechujących się podobnymi własnościami fizycznymi, umownie określonych jako klasy pseudofacjalne. Liczbę analizowanych klas wyznaczono metodą prób i błędów, jako najbardziej rozdzielczą z interpretacyjnego punktu widzenia. Istotny składnik przeprowadzonych prac stanowi dyskusja na temat wpływu metodyki modelowania i jakości danych wejściowych na uzyskiwane wyniki modelowania strukturalno-parametrycznego. Uzyskane wyniki zilustrowano na przykładzie modelowania w zachodniej części fałdu Grabownicy ze względu na najlepszą ilość i jakość danych wejściowych do modelowania parametrycznego.

TŁO GEOLOGICZNE

Wykształcenie litofacjalne oraz stratygrafia skał z fałdu Grabownicy

Najstarszymi skałami w profilu fałdu Grabownicy są warstwy wierzowskie aptu (Cieśliński 1973) (Fig. 1). Budują one starszy poziom-piaskowcowo-łupkowy oraz młodszy – łupkowy. Utwory facji piaskowcowo-łupkowej znane są jedynie z odwiertów oraz nielicznych odsłoneń w okolicach Domradza, a ich miąższość nie została określona (Wdowiarz 1953, Zwoliński 2010). Drugi typ litofacjalny został rozpoznany przede wszystkim w powierzchniowych odsłonięciach oraz w dziesięciu odwiertach położonych na obszarze Grabownicy. Jego profil jest zdominowany przez łupki z nielicznymi przewarstwieniami cienkoławicowych piaskowców. Całkowita miąższość łupkowej partii warstw wierzowskich w fałdzie Grabownicy jest szacowana na 60–120 metrów, a jej wahania są tłumaczone przede wszystkim deformacjom tektonicznym (Wdowiarz 1953).

W wyższej części profilu kredy dolnej, w albie (Fig. 1), występują trzy poziomy warstw Igockich (Koszarski 1958, Cieśliński 1973). Najstarsza część jest zdominowana przez piaskowce, jednakże wkładki łupkowe miejscami stanowią 60% tej serii (Zwoliński 2010). Dominują bogate w glaukonit drobno- lub średnioziarniste, porowate piaskowce budujące ławice o miąższości około 1.5 m oraz szare cienkoławicowe, nieprzepuszczalne piaskowce. Osady te są przewarstwione szarymi lub ciemnozielonymi łupkami o miąższości do 1 m. Sporadycznie występują zlepieńce (Wdowiarz 1953).

Spąg środkowych warstw lgockich jest dobrze udokumentowany wierceniami (Zwoliński 2010). Budujące je piaskowce są bardziej spoiste i drobnoziarniste. W górę profilu zawartość piaskowców spada do 25% na rzecz gruboławicowych łupków bezwapniowych. Ich miąższość zmienia się od 50 m do 250 m (Wdowiarz 1953).

Najlepiej rozpoznany poziomem kredy dolnej są górne warstwy lgockie, stwierdzone zarówno w licznych wierceniach, jak i odsłonięciach na obszarze całego fałdu Grabownicy. Najczęściej reprezentują je jasnoszare, drobnoziarniste, porowate piaskowce z zawartością miki. Tworzą one ławice o miąższości dochodzącej do około 1.5 m, przewarstwione twardymi szaroczarnymi łupkami bezwapniowymi. Ku górze profilu piaskowce stają się wapieniste, twardsze, bardziej drobnoziarniste i zwięzłe, a zawartość łupków wzrasta do około 50%. W górnej części profilu dominują masywne łupki zielonoszare. Charakterystyczne jest pojawienie się cienkich ławic krzemionkowych margli oraz około 10-centymetrowej ławicy rogowca. Miąższość górnych warstw lgockich jest w obrębie fałdu Grabownicy stabilna. Na całym obszarze wynosi ona 120–140 metrów.

Utwory górnej kredy w centralnej części fałdu Grabownicy są określane jako facja czarnorzecka. Budują ją warstwy godulskie oraz piaskowce czarnorzeckie (Fig. 1), w pozostałej części Karpat znane jako dolne piaskowce istebniańskie (Wdowiarz 1985). Lokalnie w profilu górnej kredy obserwowane są również łupki szarozielone i margle, które odpowiadają marglom węglowieckim (Wdowiarz 1953, Zwoliński 2010).

Granicę pomiędzy warstwami lgockimi a godulskimi wyznacza zmiana barwy łupków na czerwoną. Łupki budujące warstwy godulskie są bezwapniowe i masywne. Ich miąższość wynosi 90–120 metrów. W stropie warstw godulskich pojawia się wkładka wapienistych i grubowarstwowych łupków zielonoszarych i ciemnoszarych o miąższości wahającej się od kilkudziesięciu centymetrów do 10 m w NW części fałdu. Podobne łupki występują również w kompleksie piaskowców czarnorzeckich, wskazując na ciągłość profilu górnej kredy (Wdowiarz 1953).

Piaskowce czarnorzeckie dzielą się na dwa kompleksy. Dolny budują słabozwięzłe, wapieniste piaskowce kwarcowe nieregularnie przewarstwione zlepieńcami drobnoklastycznymi o spoiwie wapienistym. W piaskowcach występują wkładki ciemnoszarego, silnie zapiaszczonego łupka o znacznej zawartości miki. Wyżej znajduje się około 2-metrowa warstwa zlepieńca średnioklastycznego. Dolny kompleks piaskowców czarnorzeckich zamyka warstwa piaszczystych ilów i łupków o miąższości 10 m (Wdowiarz 1953, Zwoliński 2010). Wyższy kompleks budują zlepieńce kwarcowe, które przechodzą ku górze w piaskowce oraz zlepieńce kwarcowo-skaleniove. Całkowita miąższość piaskowców czarnorzeckich wynosi 80–200 metrów (Zwoliński 2010).

Paleocen fałdu Grabownicy jest reprezentowany przez około 80-metrowy kompleks łupków czarnorzeckich (Wdowiarz 1953), czyli górne łupki istebniańskie (Koszarski 1956). Są one wykształcone w postaci grubowarstwowych łupków szaroczarnych lub ciemnoszarych, przewarstwionych wkładkami piaskowców oraz marglami syderytycznymi (Wdowiarz 1985).

Profil eocenu rozpoczyna kompleks ilastych łupków pstrych o miąższości około 60 m (Ryłko 2004). Podrzędnie przeławicają je maksymalnie 10-centymetrowa wkładki drobnoziarnistych piaskowców kwarcowych z glaukonitem (Wdowiarz 1953). Wyżej zalegają

warstwy hieroglifowe – reprezentowane przez ilaste, bezwapniste łupki zielonoszare przewarstwione nielicznymi, cienkimi wkładkami bardzo drobnoziarnistych piaskowców. Miąższość kompleksu nie przekracza 70 metrów (Wdowiarz 1953).

W górę profilu utwory łupkowe przechodzą w szare, drobnoziarniste piaskowce mikowe, zwane piaskowcami podrogowcowymi, o miąższości 10–60 m. Piaskowce są przelawiczone wkładkami ciemnych łupków lub wietrzejących na biało rogowców. W niektórych strefach fałdu piaskowce podrogowcowe są zastąpione przez ok. 10-metrową serię łupków szaroczarnych (Wdowiarz 1953, Zwoliński 2010).

Eoceńskie rogowce przechodzą w łupki menilitowe, których wiek określa się na wczesny oligocen (Ryłko 2004). Warstwy menilitowe są reprezentowane przez cienkoławicowe, twarde i skrzemieniałe łupki o miąższości 40–100 metrów (Wdowiarz 1953). W stropowej partii jednostki występują wtrącenia piaskowców przechodzących w dolne warstwy krośnieńskie (Ryłko 2004), reprezentowane tu przez drobnoziarniste piaskowce z kilkumetrową wkładką zlepieńca drobnoklastycznego (Wdowiarz 1953, Zwoliński 2010).

Tektonika fałdu Grabownicy

Fałd Grabownicy jest antykliną liniową, której oś ma generalny przebieg NW–SE. Wyniki wierceń pokazują, że fałd jest nasunięty na odległość 0.5–1.5 km na utwory sąsiedniej synkliny obwodowej. W podłożu fałdu stwierdzono występowanie górnych warstw krośnieńskich oraz margli węglowickich (Wdowiarz 1953, Zwoliński 2010).

W obrębie fałdu bardzo silnie rozwinięta jest tektonika nieciągła. Uskoki tworzą dwa systemy dyslokacyjne (Stefaniuk *et al.* 2010, na podstawie: Dudek & Szewczyk 1973). Uskoki podłużne to duże, nachylone pod zmiennymi kątami dyslokacje o charakterze nasuwczym, które przebiegają równoległe do osi fałdu w kierunku NW–SE (Fig. 4). Oś fałdu jest rozcięta na szereg segmentów przez krótkie normalne uskoki poprzeczne o biegu SW–NE (Fig. 2B, 4).

MODELE STRUKTURALNO-PARAMETRYCZNE FAŁDU GRABOWNICY

Metodyka modelowania

Podstawowy etap modelowania strukturalno-parametrycznego stanowi opracowanie przestrzennego modelu strukturalnego (*grid 3D*). W programie Petrel® osnowa strukturalna (geometryczna) jest budowana z wykorzystaniem regularnych modeli powierzchni strukturalnych i miąższościowych, tzw. regularnych siatek interpolacyjnych (*grid 2D*) oraz rekonstrukcji siatki uskoków (*Fault Model*). Procedurę rozpoczyna modelowanie uskoków (*Fault Modeling*) obejmujące odtworzenie kształtu i kąta nachylenia dyslokacji. Parametry te można modyfikować elastycznie poprzez edycję geometrii kolumn kształtujących (*key pillars*). Najprostsze dyslokacje mają postać pionowych płaszczyzn. Tworzą je pionowe kolumny składające się z dwóch punktów kształtujących (*shape points*). Najbardziej złożone uskoki mogą odwzorowywać nieregularną powierzchnię uskokową nachyloną pod

zmiennym kątem. Uskoki takie zbudowane są z listrycznych bądź zakrzywionych prowadnic (*listric, curved pillars*) zawierających trzy lub pięć punktów kształtujących (Petrel 2009, Zwoliński 2010).

Kolejny etap modelowania w programie Petrel® stanowi opracowanie modelu szkieletowego (*skeleton*), inaczej gridu kolumnowego (*pillar grid*), w wyniku zastosowania tzw. procedury *pillar gridding*. Model szkieletowy składa się z trzech siatek szkieletowych wyznaczających górne i dolne zamknięcie modelu oraz jego środek. Wszystkie siatki szkieletowe składają się z takiej samej liczby węzłów o kształcie nieregularnych wieloboków. Ich zniekształcenie jest wynikiem dopasowania siatki do modelu uskokowego. Przez wszystkie oczka siatek szkieletowych można przeprowadzić ekwiwalentne kolumny (*pillars*), które mogą się „wyklinowywać” tylko na powierzchniach uskokowych lub na krawędzi modelu 3D.

W wyniku zastosowania procedury modelowania horyzontów model strukturalny jest uzupełniany przez wprowadzenie granic sekwencji geologicznych (*horizons*). Stanowią one granice kompleksów stratygraficznych (*zones*) współtworzących model 3D. Przed przystąpieniem do modelowania parametrycznego przestrzeni kompleksów jest wewnątrz warstwowa (*layering*), w taki sposób, by poprawnie odzwierciedlić wewnętrzną architekturę modelowanych kompleksów i procesy sedymentacyjno-diastraficzne prowadzące do ich uformowania. Procedura uwarstwienia modelu zamyka proces modelowania strukturalnego.

W optymalnych warunkach modelowania parametryczne obejmują kolejno modelowania zmienności facjalnej, litologicznej i na końcu zmienności parametrów petrofizycznych. Przytoczona wyżej sekwencja zapewnia najwyższą jakościową kontrolę procesu ilościowego modelowania parametrów zbiornikowych (Cosentino 2001, Coburn *et al.* 2007, Papiernik 2010a, b). W przedstawianym przypadku jakość danych geofizycznych nie pozwoliła jednak na utworzenie wiarygodnego modelu litologiczno-facjalnego, w związku z tym w trakcie realizacji tematu wykonano wyłącznie modelowania zmienności parametrów petrofizycznych i fizycznych, które wykazują ciągłą zmienność. Proces przestrzennej symulacji można wykonać stosując deterministyczne bądź stochastyczne techniki estymacji. Do najprostszych należą algorytm najbliższego sąsiada (*Closest, Closest Neighbour*) oraz algorytmy z grupy „odwrotnej” odległości (*Moving Average, Weighted Average* – Petrel 2009). Jako techniki wspomagające inne algorytmy aplikowane są tzw. algorytmy funkcyjne – m.in. trendy wielomianowe (Davis 1986, Goodman 1999, Petrel 2009). Najbardziej złożone algorytmy deterministyczne wykorzystywane w modelowaniu petrofizycznym to kriging prosty (*simple*) lub zwykły (*ordinary*) (Deutsch & Journel 1998) stosowany z trendem zewnętrznym lub bez (*Extrenal Drift*) (Dubrule 2003). Kriging jest wspomagany analizą geostatystyczną (wariogramy) analizowanych parametrów, a opcjonalnie także procedurami co-krigingu, transformacją postaci rozkładu danych i krzywymi gęstości rozkładu prawdopodobieństwa.

Oprócz metod deterministycznych do modelowania zmienności parametrów zbiornikowych wykorzystywane są również algorytmy stochastyczne oparte na podejściu iteratywnym, sekwencyjnym lub bezpośrednim (Dubrule 1998). Niezależnie od podejścia, algorytmy stochastyczne umożliwiają tzw. modelowanie warunkowane (*Conditional Modelling*), które gwarantuje, że w trakcie każdej symulacji statystycznej modele 3D i otworowy (1D) w miejscu przecięcia zawsze będą zgodne. Do najczęściej współcześnie stosowanych algo-

rytmów stochastycznych należy algorytm sekwencyjny (*Sequential Gaussian Simulation* – SGS; Gomez-Hernandez & Journel 1993, Dubrule 1998, Petrel 2009). Także w przypadku modelowań stochastycznych procedura modelowania jest sterowana za pomocą wariogramów, a opcjonalnie wspomagana procedurami co-krigingu, transformacją postaci rozkładu danych i krzywymi gęstości rozkładu prawdopodobieństwa.

Ze względu na słabą jakość danych geofizycznych nie opracowano dyskretnego modelu litologiczno-facjalnego dla fałdu. Jednakże na podstawie modeli RT, PS, VCL i PHI opracowano dyskretne modele „pseudofacjalne” uwzględniające podobieństwa zależności ciągłych zmiennych fizycznych i petrofizycznych. Zastosowano do tego celu, wykorzystując sieci neuronowe, moduł *Train Estimation Model* (Petrel 2009).

Dane wejściowe

Model strukturalny

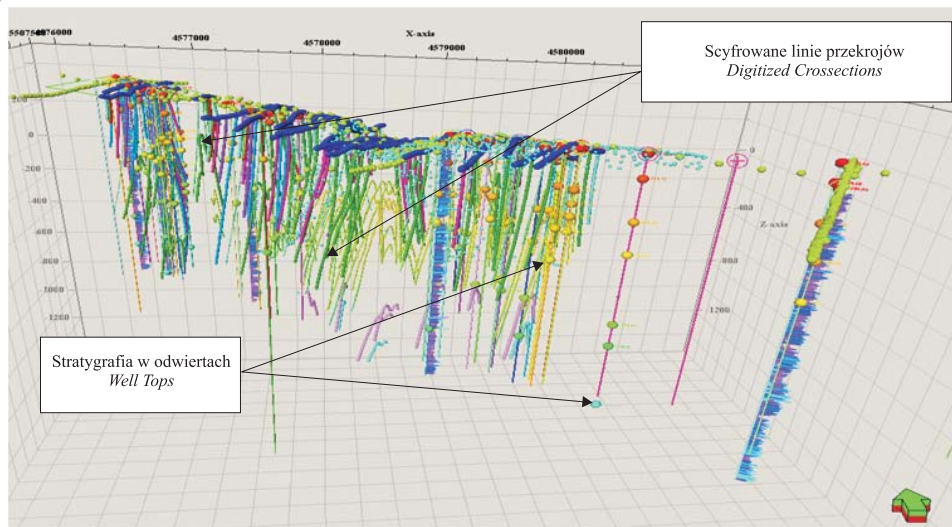
Jako podstawowe dane do opracowania modelu strukturalnego fałdu Grabownicy wykorzystano przekroje i profile otworów z opracowania *Budowa geologiczna fałdu Grabownicy* (Wdowiarz 1953) (Fig. 3A), które stanowią najbardziej spójną koncepcję budowy antykliny Grabownicy. Odzworowują one położenie głównych dyslokacji poprzecznych oraz ukształtowanie powierzchni stropowych jednostek litostratygraficznych występujących w obrębie fałdu. Przekroje te scyfrowano i skalibrowano przestrzennie w odwzorowaniu „PUWG 1942”, wykorzystując autorską procedurę przetwarzania numerycznego opracowaną w KSE AGH (Papiernik *et al.* 2010a). Cyfrowanie objęło ukształtowanie granic jednostek stratygraficznych i uskoków z systemu NW–SE (Fig. 3A) oraz położenie granic geologicznych w profilach odwiertów.

Podstawowe znaczenie dla jakości modelu miała również archiwalna *Mapa strukturalna stropu piaskowca dolnej kredy (dk3-1) w rejonie złoża ropy naftowej Grabownica* (Stefaniuk *et al.* 2010, na podstawie: Dudek & Szewczyk 1973). Odzwierciedla ona najdokładniej odwzorowaną kartograficznie powierzchnię strukturalną w obrębie fałdu Grabownicy. W procesie modelowania granica ta stanowiła powierzchnię/płaszczyznę odniesienia dla kompleksów wyżej- i niżejleżących. Opisywana mapa dostarczyła również danych na temat przebiegu uskoków obu wyróżnianych w fałdzie Grabownicy systemów. W przypadku uskoków rozwiniętych w kierunku SW–NE, była ona zasadniczym źródłem informacji.

Ważny zbiór danych wykorzystywanych w procesie modelowania strukturalnego stanowią profile stratygraficzne otworów. Są to dane o charakterze punktowym, umożliwiające korektę horyzontów poprzez eliminację nadmiernego wygładzenia modelu strukturalnego. Poprawne dowiązanie osnowy geometrycznej modelu do profili wierceń ma zasadnicze znaczenie dla jakości późniejszych modelowań parametrycznych. Wykorzystane w przedstawianym opracowaniu profile stratygraficzne pochodziły z bazy danych otworowych PGNiG SA bądź z opracowania Wdowiarza (1953). W sumie zgromadzono profile stratygraficzne 40 odwiertów, które zostały później użyte do dowiązania modeli powierzchni strukturalnych do profili wierceń.

Jako górne, erozyjne zamknięcie modelu 3D wykorzystano cyfrowy model powierzchni terenu, opracowany w formie grida w formacie ZMAP+ (Górecki *et al.* 2009).

A)



B)

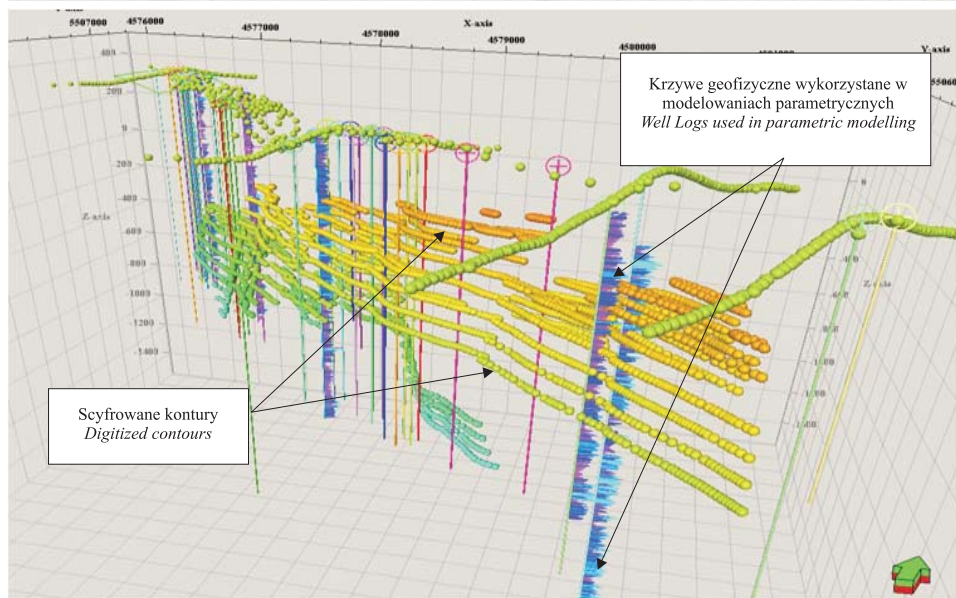


Fig. 3. Dane wejściowe do modelowania: A) wynik cyfrowania przekrojów autorstwa S. Wdowiarza (Wdowiarz 1953) oraz stratygrafia w odwiertach; B) scyfrowana mapa strukturalna stropu piaskowca dolnej kredy (dk31) w rejonie złoża ropy naftowej Grabownica (Stefaniuk *et al.* 2010, na podstawie: Dudek & Szewczyk 1973) i dane do modelowań petrofizycznych

Fig. 3. Input data for modeling: A) result of digitization of crosssections constructed by Wdowiarz (1953) and the stratigraphy in wells; B) digitized structural map on top of the Lower Cretaceous sandstone (dk31) in the area of the Grabownica oil field (Stefaniuk *et al.* 2010, after Dudek & Szewczyk 1973) and data for petrophysical modeling

Modelowania parametryczne

W wyniku intensywnych prac poszukiwawczych strukturę rozpoznano pod względem naftowym już do połowy lat 50. XX wieku, jednakże ze względu na niewłaściwy sposób prowadzenia dokumentacji geologicznej jednostki stratygraficzne zostały prawidłowo zidentyfikowane jedynie w 40 odwiertach. Wiercenia prowadzono jednak bez odpowiedniej dokumentacji geologicznej, w rezultacie stratygrafię rozpoznano w zaledwie 40 odwiertach. Prosta technika wierceń sprawiła, że nie zostały wykonane laboratoryjne analizy parametrów zbiornikowych. Profilowania geofizyki otworowej umożliwiające interpretację litologiczno-złożową przeprowadzono w zaledwie pięciu odwiertach (Fig. 3B), a uzyskane w ich wyniku krzywe są niekompletne i bardzo słabe jakościowo. Takie materiały pozwalają wykonać tylko podstawowe procedury interpretacyjne, umożliwiające obliczenie współczynników zailenia, zapiaszczenia i porowatości utworów. Powyższe czynniki spowodowały, iż interpretację ilościową należy uznać za przybliżoną. Wyniki pomiarów radiometrycznych wyrażono w impulsach na minutę. Jednostki te wymagały przeliczenia na jednostki umowne.

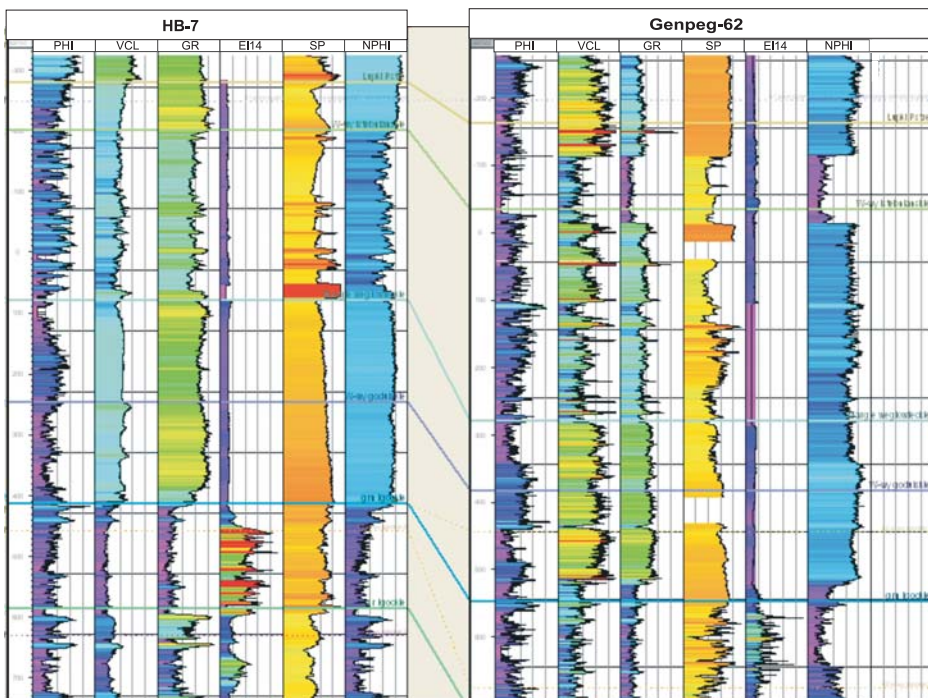


Fig 4. Wykorzystane do modelowania parametrycznego krzywe geofizyczne z odwiertów Humniska Brzozów-7 i Genpeg-62. Objasnienia: PHI – krzywa porowatości, VCL – krzywa zailenia, GR – krzywa promieniotwórczości naturalnej, EL14 – krzywa oporności, SP – krzywa polaryzacji samoistnej, NPHI – krzywa porowatości neutronowej

Fig. 4. Well logs from the Humniska Brzozów-7 and Genpeg-62 wells used for parametric modeling. Explanations: PHI – porosity log, VCL – clay volume log, GR – gamma ray log, EL14 – resistivity log, SP – spontaneous polarity log, NPHI – neutron porosity log

Wykorzystując system GEO w procesie normalizacyjnego zestawienia dostępnych profilowań (zamiennie: opornościowych lub neutronowych), poprzez kalibrację i skalowanie, generowano brakujące profilowania. Interpretację składników litologicznych i porowatości wykonano w roku 2009 z wykorzystaniem programu Interactive Petrophysics®.

W przypadku otworu Genpeg-62 (Fig. 4) dysponowano pomiarami wykonanymi do głębokości 1097 m. Pomiary przeprowadzono w 13 odcinkach. Wymagały one, w procesie normalizacji i korekcji, uzupełniania zapisów brakujących próbek krzywych geofizycznych. Wykonano korektę pomiarów radiometrycznych na wpływ średnicy otworu. Korzystając z pakietu Win systemu GeoWin (Jarzyna *et al.* 2002), przeliczono oporność RT (pozorna oporność na rzeczywistą). W otworze wyinterpretowano również zailenie i porowatość.

W otworze Humniska Brzozów-7 (HB-7) (z 1986 r.) dostępne były pomiary elektryczne, radiometria oraz od głębokości 933 m do spągu (1124 m) pomiar akustyczny. Po zastosowaniu poprawek do pomiarów radiometrycznych na średnicę i po przeliczeniu RT, obliczono w sposób ciągły zailenie i porowatość w całym profilu otworu (Fig. 4).

Wyniki modelowania strukturalnego

W wyniku integracji wymienionych danych wejściowych opracowano trzy modele strukturalne na obszarze fałdu Grabownicy (Fig. 5, 2B). Ich zasięg ustalono arbitralnie, biorąc pod uwagę efektywność przetwarzania numerycznego. Największą ilość danych wejściowych pozyskano w centralnej części fałdu (**model centralny – MC**). Wschodnia część fałdu (rejon kopalni Graby-Wanda) cechuje się wyraźnie odmiennym stylem strukturalnym. Strefa ta została słabiej zbadana przez Wdowiarza (1953), jednakże dobre rozpoznanie wiertnicze pozwoliło zbudować w tym rejonie stosunkowo wiarygodny model strukturalny (**model wschodni – MW**).

Model zachodni (MZ) powstał w wyniku ekstrapolacji trendów strukturalnych i tektonicznych modelu centralnego, które następnie zostały dowiązane do profili wierceń HB-7 i Genpeg-62 znajdujących się w obrębie MZ, na północnym skrzydle fałdu Grabownicy. Ze względu na słabe geologiczne rozpoznanie profilu kredy dolnej w otworze HB-7, również korelacja stratygraficzna z odwiertem Genpeg-62 na podstawie krzywych geofizycznych nie daje możliwości precyzyjnego rozpoznania profilu warstw lgockich.

Z tego powodu w MZ wyróżniono tylko pięć kompleksów stratygraficznych:

- warstwy lgockie,
- warstwy godulskie,
- warstwy czarnorzeckie,
- warstwy hieroglifowe,
- w strefie brzeżnej warstwy menilitowe (Fig. 6, 2B).

Ich granice stanowią: przybliżony strop warstw wierzowskich (hipotetyczna powierzchnia stanowiąca dolne zamknięcie modelu, obliczona w wyniku odjęcia od stropu dolnych warstw lgockich arbitralnie określonej miąższości); strop warstw lgockich; strop warstw godulskich; powierzchnia erozyjna wyznaczająca w różnych rejonach fałdu strop piaskowców czarnorzeckich, łupków czarnorzeckich lub łupków pstrych; strop warstw hieroglifowych; powierzchnia terenu.

Model uskokowy w MZ obejmuje dwa systemy dyslokacji. W skład systemu NW–SE wchodzi stromo zapadająca ku S duża dyslokacja o nieregularnej powierzchni, przebiegająca w przybliżeniu równoległe do osi fałdu oraz położony w SE części modelu niewielki uskok normalny rozwinięty w kierunku SW–NE. Model cechuje się znacznym stopniem przybliżenia ze względu na brak dokładnych danych kartograficznych w zachodniej części fałdu Grabownicy.

Model przyjęty jako końcowa wersja MZ składa się z pięciu sekwencji geologicznych. Buduje go 2 445 098 komórek ($134 \times 71 \times 257$ komórek w kierunkach $nI \times nJ \times nK$), przy czym 749 728 komórek ma zdefiniowane wartości modelu parametrycznego. W płaszczyźnie poziomej model tworzą siatki o boku ok. 10 m. W płaszczyźnie pionowej zastosowano warstwowanie równoległe do spągu o stałej miąższości około 10 m. W modelu wynikowym po wykonaniu serii testów dla dwóch najniższych sekwencji (warstw godulskich i wierzowskich) zastosowano warstwowanie proporcjonalne – uznano, że w odniesieniu do posiadanych parametrycznych danych wejściowych (omówionych dalej) najlepiej oddaje ono wewnętrzną zmienność, a zwłaszcza złożoną geometrię niższych kompleksów geologicznych. Dodatkowo warstwowanie proporcjonalne zapewnia najlepsze rezultaty modelowań mających charakter wstępnego rozpoznania struktury. Kompleksy te podzielono na 30 proporcjonalnych warstw, co pozwoliło uzyskać miąższości poszczególnych warstw zbliżone do 10 m.

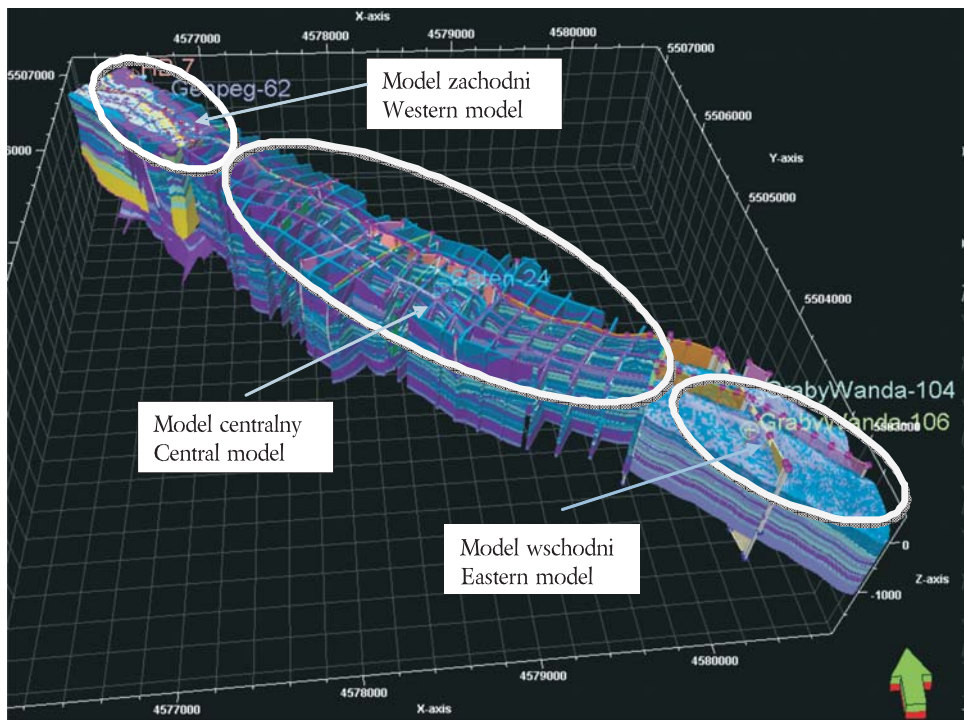


Fig. 5. Położenie modeli strukturalno-parametrycznych wykonanych na obszarze fałdu Grabownicy

Fig. 5. Location of structuralparametric models constructed for the Grabownica Fold area

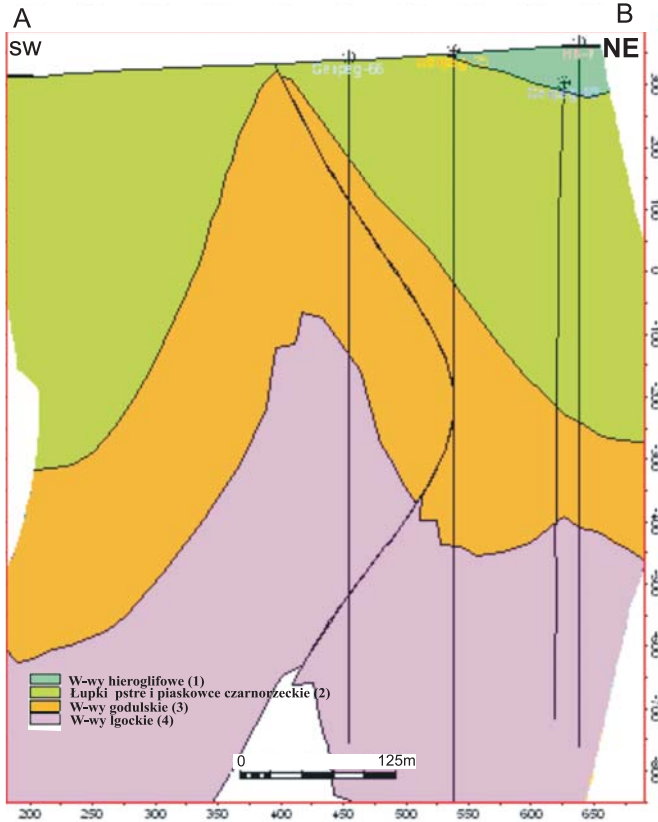


Fig. 6. Przekrój strukturalny przez środkową część modelu zachodniego

Fig. 6. Structural cross section through the central part of the Western Model. Explanations: 1 – Menilite Beds, 2 – Hieroglyphic Beds, 3 – Variegated Shales and Czarnorzecki Sandstones, 4 – Godula Beds, 5 – Lgota Beds

Wyniki modelowania

Model potencjałów polaryzacji naturalnej (PS)

Zmienność PS w modelu zachodnim wizualizowano w zakresie od <75 mV do >100 mV. W profilu warstw czarnorzeckich i łupków pstrych model wykazuje wysoką, drobnorytmiczną zmienność w zakresie od 80 mV do > 100 mV. W warstwach godulskich potencjał polaryzacji naturalnej jest zdecydowanie bardziej jednorodny, co wskazuje na brak zmienności facjalnej. W kompleksie tym zaznacza się równomierny wzrost mineralizacji ku dołowi. W profilu warstw lgockich PS występują duże anomalie, sugerujące występowanie przewarstwień skał zbiornikowych i uszczelniających. W utworach tych zaznacza się również bardzo wyraźny, choć nierównomierny trend spadkowy PS (Fig. 7A, 2B). Model w najniższej części profilu ma niską wiarygodność ze względu na niedostateczną kontrolę danymi wejściowymi.

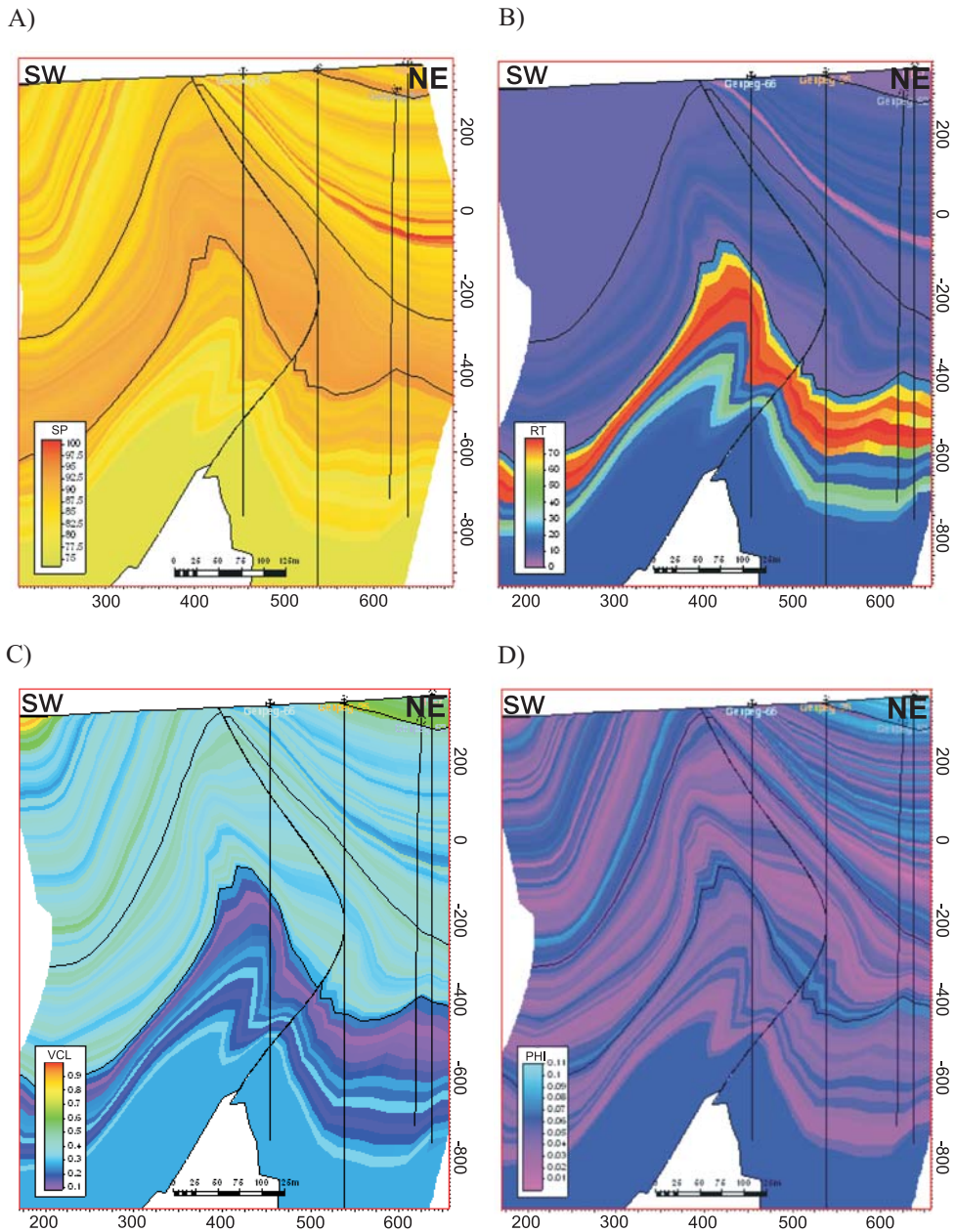


Fig. 7. Wyniki modelowań parametrycznych w obrębie modelu zachodniego: A) potencjał polaryzacji naturalnej (PS); B) oporność pozorną (RT); C) zailenie (VCL); D) współczynnik porowatości (PHI)

Fig. 7. Results of parametric modeling within the Western Model: A) spontaneous potential (SP); B) apparent resistivity (RT); C) clay content (VCL); D) porosity (PHI)

Model oporności (RT)

Oporność w zachodniej części fałdu Grabownicy cechuje się bardzo wyraźnym zróżnicowaniem. Utwory budujące płycej położone kompleksy – warstwy menilitowe, hieroglifowe, łupki pstre i piaskowce czarnorzeckie oraz warstwy gadulskie – wykazują generalnie niską choć lokalnie zróżnicowaną w pionie oporność, zmieniającą się w zakresie 0–30 $\Omega\cdot\text{m}$. Na tym tle wyróżniają się warstwy lgockie, w których oporność waha się w zakresie 0–70 $\Omega\cdot\text{m}$. Szczególnie mocno wyróżnia się przystropowy kompleks (ok. 100-metrowej miąższości), odpowiadający w przybliżeniu warstwom lgockimi górnym, w którym oporność wynosi ponad 60 $\Omega\cdot\text{m}$. Głębiej oporność wyraźnie spada, ale nie osiąga tak niskich wartości jak w płytkiej części badanego rejonu (Fig. 7B, 2B).

Model zailenia (VCL)

Uzyskane wyniki modelowania wskazują, że zailenie najpłycej położonych warstw menilitowych oraz hieroglifowych jest najwyższe i zmienia się w zakresie 60–90% (Fig. 7C). Łupki pstre i piaskowce czarnorzeckie są zdecydowanie słabiej zailone, a w ich obrębie można zaobserwować naprzemianległe wkładki o zaileniu około 50% i 20%, które wskazują na silne pionowe zróżnicowanie litologiczne kompleksu. Ku dołowi zailenie kompleksu rośnie, osiągając w warstwach godulskich poziom 30–60%. Podobnie jak w przypadku oporności w profilu MZ wyróżnia się najwyższa część warstw lgockich, gdzie zailenie spada do 10–20%. Ku dołowi zailenie kompleksu wzrasta do 30–40%, jednakże tu również widoczne są przewarstwienia skał bardziej piaszczystych.

Model porowatości (PHI)

Odtworzona na podstawie modelu porowatość zmienia się w zakresie 0–11% (Fig. 7D, 2B), przy czym, inaczej niż w modelach RT i VCL, w obserwowanym rozkładzie parametru nie zaznaczają się strefy wyraźnie anomalne. Warstwy o gorszej i lepszej porowatości są rozprzestrzenione w całym profilu fałdu dość równomiernie. Zaskakujące jest występowanie strefy obniżonej porowatości w przystropowej partii kompleksu lgockiego. Pozostaje to w sprzeczności z wynikami modelowania zailenia i oporności. Strefy relatywnie wyższych porowatości występują w przyspągowej części warstw godulskich, w centralnej i przystropowej części profilu kompleksu łupków pstrych i piaskowców czarnorzeckich, a także w warstwach hieroglifowych. One także nie korelują dobrze z rozkładem zailenia. Taka niezgodność wyników może wskazywać na słabą jakość interpretacji litologiczno-złożowej, co może być konsekwencją niewystarczającej jakości wejściowych krzywych geofizycznych.

Klasyfikacja „pseudolitologiczna” skał na podstawie zmienności analizowanych parametrów

Stosując narzędzie *Train Estimation Model* (Petrel®), dokonano statystycznego podziału profilu geologicznego modelu zachodniego na pięć klas petrofizycznych (Fig. 8A, 2B). Utwory wydzielone jako klasa 0 tworzą przewarstwienia występujące wyłącznie w obrębie kompleksu łupków pstrych i warstw czarnorzeckich. Tworzą one również miąższe wkładki w środkowej części profilu warstw lgockich, gdzie odpowiadają przebiegowi wkładek o podwyższonej oporności i obniżonym zaileniu. Skały zakwalifikowane do klasy 1 budują

niemal cały profil warstw godulskich. Podrzędnie występują one również w profilu łuków pstrych i warstw czarnorzeckich. Najbardziej jednoznaczny jest przestrzenny rozkład utworów zaliczonych do klasy 2. Występują one w mięszym przystropowym kompleksie warstw lgockich, odpowiadając partiom profilu, które cechuje wysoka oporność i zailenie (Fig. 7B, C, 2B). Utwory zaliczone do klasy 3 są rozproszone w całym profilu MZ, jednak w obrębie warstw lgockich ich występowanie jest ograniczone do najwyższej przystropowej partii (Fig. 8A).

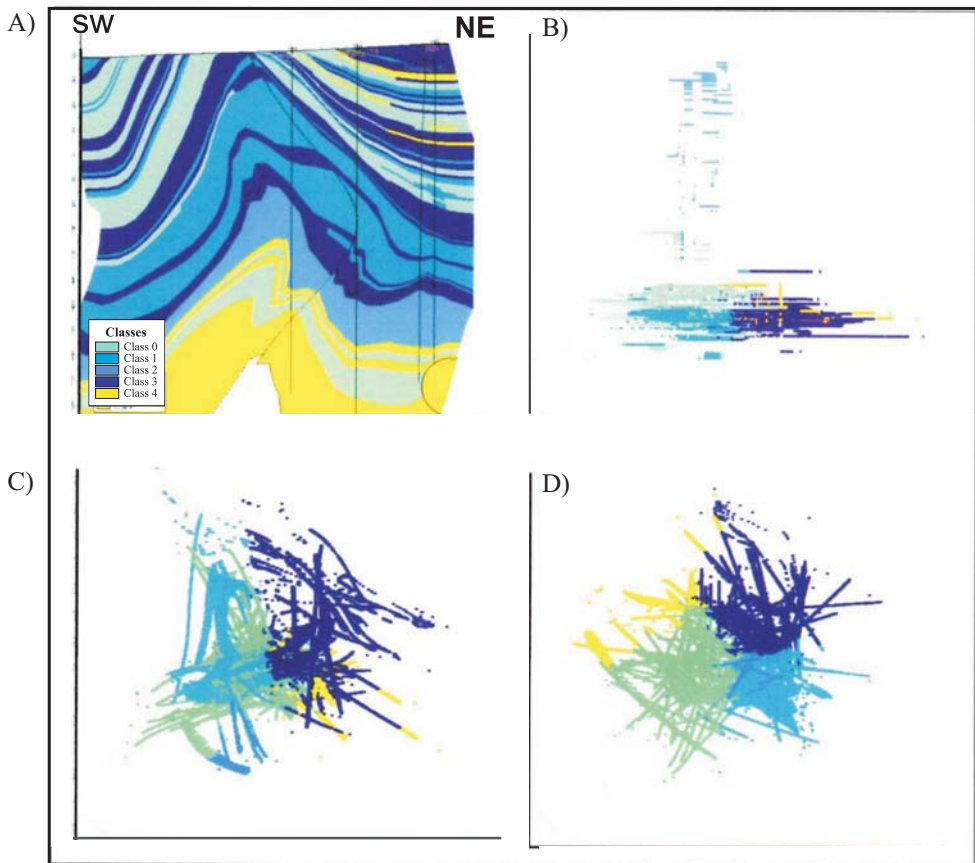


Fig. 8. Dyskretna klasyfikacja „pseudofacjalna” uzyskana na podstawie modeli parametrycznych VCL, PHI, PS, RT w wyniku wykorzystania modułu *Train Estimation*: A) model dyskretny z podziałem na pięć klas; B) zależność porowatości (PHI) od oporności; C) zależność porowatości (PHI) od zailenia (VCL); D) zależność porowatości (PHI) od potencjału polaryzacji naturalnej (PS)

Fig. 8. Discrete “pseudofacies” classification obtained on the basis of parametric models of VCL, PHI, SP, and RT as a result of using the *Train Estimation* module: A) discrete model with subdivision into five classes; B) relationship between porosity (PHI) and resistivity (RT); C) relationship between porosity (PHI) and clay content (VCL); D) relationship between porosity (PHI) and spontaneous potential (SP)

Warstwy zaliczające się do klasy 4 są obserwowane przede wszystkim w centralnej i dolnej części warstw lgockich. Incydentalnie tworzą one również wkładki w górnej części profilu kompleksu łupków pstrych i piaskowców czarnorzeckich (Fig. 8A).

PODSUMOWANIE WYNIKÓW MODELU ZACHODNIEGO

Uzyskane wyniki wskazują, że utwory w analizowanej strefie cechuje bardzo wysoka zmienność pionowa. Przejawia się to naprzemianległym występowaniem warstw o kontrastujących wartościach parametrów petrofizycznych. Na tym tle bardzo silnie wyróżnia się przystropowa część warstw lgockich, cechująca się wysoką opornością płynów złożowych i niskim zaileniem profilu. Strefa ta wyróżnia się również jako wyraźnie zindywidualizowana klasa uzyskana w wyniku zastosowania analizy wspomaganą siecią neuronową. Czynnikiem osłabiającym jednoznaczność tej diagnozy jest występowanie w omawianej partii profilu strefy obniżonej porowatości PHI.

Jakość i dostępność danych petrofizycznych jest w modelu zachodnim najpoważniejszym czynnikiem rzutującym na wiarygodność wyników. Jego południowe, niekontrolowane danymi petrofizycznymi skrzydło, jest oddzielone od skrzydła północnego uskokiem. W rezultacie ekstrapolowane z północy na południe trendy zmienności parametrycznej mogą być w tej strefie fałszywe.

Oddzielny problem stanowi w tej części fałdu Grabownicy osnowa geometryczna modelu. W omawianej strefie wystarczającą kontrolę stratygraficzną dawał tylko profil otworu HB-7. Na podstawie zmienności krzywych geofizycznych dowiązано do niego profil odwiertu Genpeg-62. Na pozostałym obszarze fałdu geometrię powierzchni strukturalnych i dyslokacji zrekonstruowano w wyniku ekstrapolacji trendów strukturalnych z częściowo nakładającego się obszaru modelu centralnego, dobrze udokumentowanego pracami S. Wdowiarza (Wdowiarz 1953).

Przedstawione modelowania można wykorzystywać w poszukiwaniach naftowych do wskazania stref potencjalnie nasyconych węglowodorami. Bezpośrednią przydatność prospekcyjną przedstawionych modeli osłabia, spowodowany niską jakością danych geofizycznych, brak modelu nasycenia.

DYSKUSJA WYNIKÓW NA PRZYKŁADZIE MODELU ZACHODNIEGO

Mimo że najważniejsze wyniki modelowania podsumowano w poprzednim rozdziale, ze względu na wyjątkową złożoność budowy geologicznej analizowanego obiektu i bardzo słabą jakość danych wejściowych autorzy przeprowadzili dodatkową dyskusję wyników. Szczególnie dużą uwagę zwrócono na techniczne ograniczenia modelowań strukturalno-parametrycznych w rejonach o budowie fałdowo-nasunięciowej oraz problemy jednoznacznej identyfikacji facjalnej w wyniku zastosowania *Train Estimation*.

Wpływ osnowy geometrycznej na wynik modelowania

Pierwszym z czynników wpływających w zasadniczy sposób na uzyskiwane wyniki jest jakość osnowy geometrycznej modelu 3D, czyli zgodność granicznych powierzchni strukturalnych i uskoków z wejściowymi danymi otworowymi oraz sejsmicznymi. Jednakże nie mniej istotnym elementem osnowy jest wewnętrzna architektura wydzielanych kompleksów, która jest uzależniona od warstwowania (*layering*).

W obiektach o budowie zbliżonej do fałdu Grabownicy najbardziej poprawny podział wewnętrzny powinno stanowić warstwowanie o stałej miąższości równoległe do spągu kompleksu. W strefach występowania erozji pozwala ono zrekonstruować zjawisko erozyjnego ścięcia warstw budujących kompleksy. Wynik modelowania z zastosowaniem takiego podziału przedstawiono na przykładzie modelu zailenia warstw łgockich (Fig. 9A, 2B). Ze względu na bardzo silne zróżnicowanie kształtu spągu kompleksu i jego zmienną miąższość warstwy (*layers*) ulegają wyklinowaniu na stropie, w przypadkowym miejscu. Rozległe partie kompleksu łgockiego zaznaczone na rysunku literą A zostały wymodelowane jako strefy niezailone. Jest to ewidentny artefakt spowodowany brakiem dostatecznej kontroli warstw przez dane wejściowe i modele otworowe.

Na figurze 9B przedstawiono wynik modelowania VCL po zastosowaniu warstwowania równoległego do spągu, z uwzględnieniem powierzchni odniesienia – tu wygładzonej powierzchni biegnącej w przybliżeniu równoległe do stropu i spągu warstw łgockich. Przedstawiony wariant zawiera artefakty na jeszcze większym obszarze warstw łgockich.

Model, w którym zastosowano warstwowanie o stałej miąższości, równoległe do stropu kompleksu przedstawia figura 9C. Również w tym modelu, ze względu na słabą kontrolę danymi wejściowymi, wyniki uzyskane na dużym obszarze są artefaktami (A). W przeciwieństwie do poprzednio opisywanych wersji część kompleksu niekontrolowana danymi jest przedstawiona jako obszar stosunkowo mocno zailony.

Uwzględniając przedstawione trudności, do opracowania geometrii warstw łgockich w modelu zachodnim wykorzystano warstwowanie proporcjonalne – podzielono przestrzeń między stropem i spągami na 30 poprowadzonych równoległe do spągu warstw o zmiennej miąższości. We wszystkich pozostałych kompleksach MZ z powodzeniem zastosowano najbardziej poprawne geologicznie warstwowanie „stałomiąższościowe”, równoległe do spągu (Fig. 9D).

Ocena jednoznaczności wyników klasyfikacji z wykorzystaniem sieci neuronowych

Wizualna ocena wykorzystania modułu *Train Estimation Model* nie jest jednoznaczna. Część z wydzielonych klas sprawia wrażenie jednoznacznych (np. klasa 2 i 4), jednakże inne wyglądają na dość przypadkowo rozproszone w profilu analizowanych warstw. By zrozumieć ilościowe znaczenie wyróżnionych klas, wykonano szereg korelacji zmiennych wykorzystanych do opracowania klasyfikacji (Fig. 8C, D).

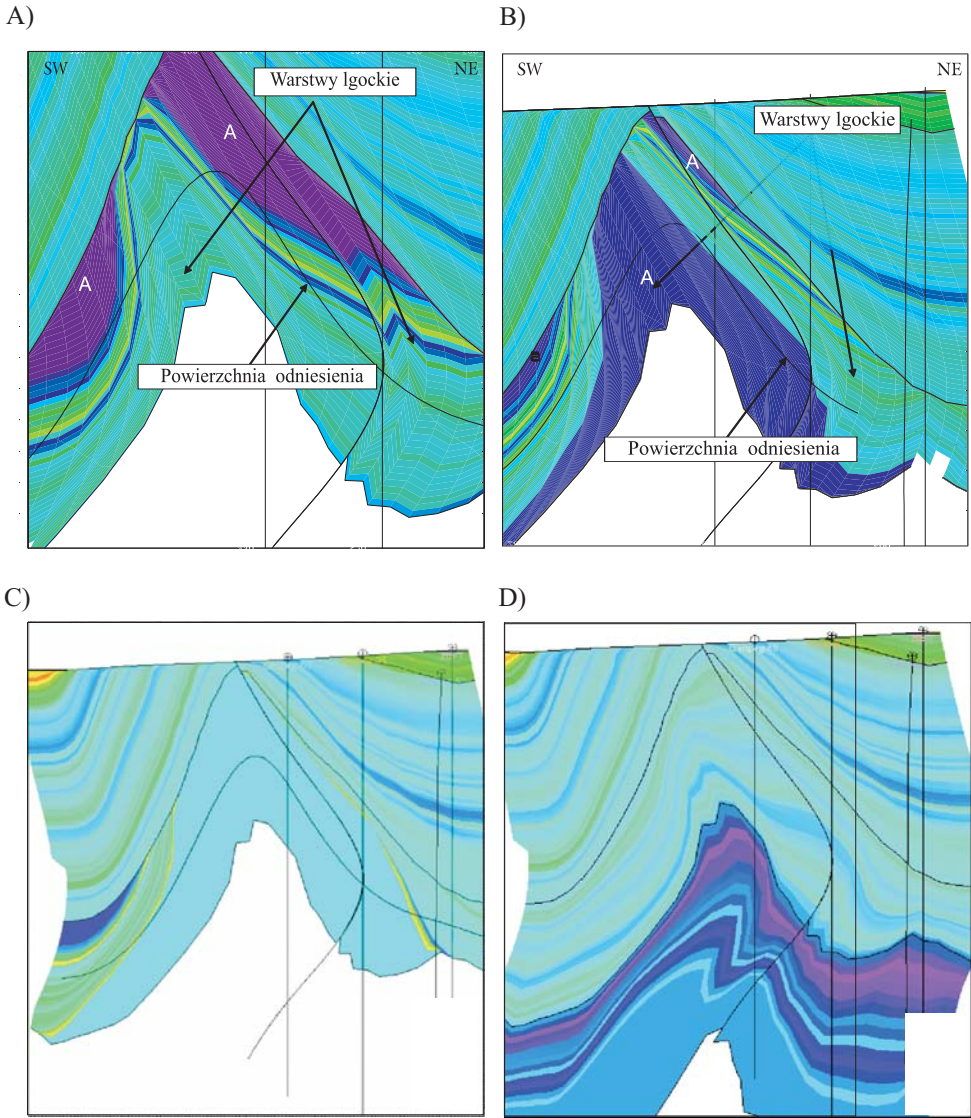


Fig. 9. Wpływ uwarstwienia (*layering*) sekwencji geologicznych (*zones*) na wynik modelowania, zilustrowany alternatywnymi modelami zailenia warstw lgockich: A) warstwowanie równoległe do spągu; B) warstwowanie równoległe do spągu z uwzględnieniem powierzchni odniesienia; C) warstwowanie równoległe do stropu; D) warstwowanie proporcjonalne (zastosowane w modelu finalnym); artefakty oznaczone jako A

Fig. 9. Influence of layering of geological sequences (*zones*) on modeling results, illustrated with alternative models of clay content in the Lgota Beds: A) layering parallel to the bottom; B) layering parallel to the bottom with regard to the reference level; C) layering parallel to the top; D) proportional layering (used in the final model); artefacts marked by A

Korelacja pomiędzy porowatością, a opornością pozwala wydzielić w sposób jednoznaczny tylko utwory zaliczane do klasy 2 (Fig. 8A, B). Pola zajęte przez dane z pozostałych klas przenikają się, nie pozwalając jednoznacznie przyporządkować do poszczególnych klas zakresów zmienności przedstawianych parametrów. Wykres zależności zailenia (VCL) od porowatości (PHI) (Fig. 8A, C) wykazuje na jeszcze niższe uporządkowanie. Praktycznie wszystkie wyróżnione klasy przenikają się ze zmienną intensywnością. Stosunkowo najlepiej zdefiniowane są osady zaliczone do klas 2 i 3. Wykres zależności porowatości PHI od potencjału polaryzacji naturalnej PS (Fig. 8A, D), w porównaniu z pozostałymi omawianymi diagramami, wskazuje na najwyższą jednoznaczność wyników. Utwory wyróżnionych klas tworzą wyraźne, nienakładające się skupiska. Jedynym odstępstwem jest centralne położenie próbek zaliczonych do klasy 2.

Przestrzenna ocena wyników klasyfikacji na podstawie parametrów fizycznych wykonanej z użyciem narzędzia *Train Estimation Model* oraz ocena wybranych wykresów zależności niektórych zmiennych użytych do opracowania klasyfikacji dowodzą, że jest to obiecujące narzędzie. Może ono być szczególnie przydatne do wyróżniania w modelu 3D stref o podobnych cechach fizycznych i petrofizycznych, jednak warunkiem obliczenia dobrych jakościowo „pseudolitologicznych” modeli dyskretnych na podstawie modeli parametrycznych jest dobra jakość danych wejściowych.

Przedstawiane modele i interpretacje zostały opracowane z zastosowaniem programów Petrel® 2009.2 oraz Interactive Petrophysics®, udostępnionych Akademii Górniczo-Hutniczej przez firmę Schlumberger (*Schlumberger Integrated Solutions*) w ramach umowy o wspieraniu działalności dydaktycznej i naukowej.

Zaprezentowane w artykule badania wykonano w latach 2009–2010 w ramach realizacji tematu „Opracowanie nowatorskich metod wykrywania złóż węglowodorów oraz rozpoznawania struktury i zmienności złóż w trakcie ich eksploatacji za pomocą kompleksu głębokich i średniozasięgowych badań elektromagnetycznych” (projekt rozwojowy 13102 finansowany ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego).

LITERATURA

- Bujalski B. & Obtulowicz J., 1931. Humniska – Grabownica Starzeńska. *Statystyka Naftowa Polski*, 12 (1), Karpacki Instytut Geologiczno-Naftowy, Warszawa – Borysław – Lwów.
- Cieśliński S., 1973. Kreda. W: Sokołowski S. (Ed.), *Budowa geologiczna Polski t. 1, cz. 2: Mezozoik*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa, 566–579.
- Coburn T.C., Yarus J.M. & Chamber R.L. (Eds), 2007. Stochastic modeling and geostatistics: Principles, methods, and case studies, vol. 2. *AAPG Computer Applications in Geology*, 5, American Association Of Petroleum Geologists (AAPG).
- Cosentino L., 2001. *Integrated Reservoir Studies*. Editions Technip.
- Davis J.C., 1986. *Statistics and data analysis in geology (2nd edition)*. John Wiley & Sons, New York.

- Deutsch C. & Journel A.G., 1998. *GSLIB, Geostatistical Software Library and Users Guide*. Oxford University Press, New York.
- Dubrule O., 1998. Geostatistics in Petroleum Geology. *AAPG Continuing Education Course Note Series*, No. 38, AAPG, Tulsa, Oklahoma, USA.
- Dubrule O., 2003. Geostatistics for Seismic Data Integration in Earth Models. *Distinguished Instructor Short Course. Distinguished Instructor Series, SEG/EAGE*, Tulsa, Oklahoma, USA.
- Gomez-Hernandez J.J. & Journel A.G., 1993. Joint Sequential Simulation of Multigaussian Fields, W: Soares A. (Ed.), *Geostatistics Troia '92*, 85–94.
- Goodman A., 1999. *Trend surface analysis in the comparison of spatial distributions of hillslope parameters*. Deakin University (rozprawa doktorska).
- Górecki W. (kier.), 2009. *Dokumentacja merytoryczna projektu PBS/PUPW/6/2005 „Badania transgraniczne wgłębnych struktur geologicznych brzeżnej strefy Karpat w aspekcie odkryć i udostępniania nowych złóż ropy naftowej i gazu ziemnego”*. Blok VII, cz. I. Archiwum KSE, AGH.
- Jarzyna J., Twaróg W., Gądek W., Bała M., Cichy A., Gąsior I., Karczewski J., Marzencki K., Stadtmuller M. & Zorski T., 2002. *Przetwarzanie i interpretacja profilowań geofizyki wiertniczej, system GeoWin*. AGH, Kraków.
- Jaskólski S., 1931. Sprawozdanie z badań geologicznych wykonanych w r. 1931 w okolicach Domradza na arkuszu Tyczyn – Dynów. *Państwowy Instytut Geologiczny, Posiedzenia Naukowe*, 33, 22–24.
- Koszarski L., 1956. Stratygrafia jednostki śląskiej i podśląskiej na północ od Sanoka. *Przegląd Geologiczny*, 4, 10, 461–463.
- Koszarski L., 1958. Perspektywy poszukiwań naftowych w fałdzie Grabownicy. *Przegląd Geologiczny*, 6, 5.
- Obtułowicz J., 1933. Sprawozdanie z badań geologicznych wykonanych w r. 1932 na arkuszu Dynów. *Państwowy Instytut Geologiczny, Posiedzenia Naukowe*, 36, 51–53.
- Obtułowicz J., 1936. Stosunki geologiczne oraz możliwości oraz możliwości uzyskania nowych złóż ropnych w rejonie Węglówki. *Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego*, 12, 631–643.
- Papiernik B., 2008a. *Przestrzenne (3D) modelowanie komputerowe wnętrza Ziemi – Geomodeling. Wstęp do wykorzystania pakietu programów Petrel 2007*. Materiały z wykładów, [on-line:] www.geol.agh.edu.pl/~papiern.
- Papiernik B., 2008b. *Modelowanie powierzchni z wykorzystaniem programu Petrel – podstawowe algorytmy estymujące*. Materiały z wykładów, [on-line:] www.geol.agh.edu.pl/~papiern.
- Papiernik B., 2010a. Wpływ metodologii przetwarzania na wyniki statycznego modelowania 3D. *Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu*, 170, 213–217.
- Papiernik B., 2010b. *Ocena ropo-gazonośności i obszaru Proszowice – Busko – Pińczów w południowej części niecki miechowskiej, wspomagana trójwymiarowym statycznym modelowaniem komputerowym*. AGH, Kraków (rozprawa doktorska).

Petrel® 2009.2. Manual – instrukcja obsługi programu Petrel.

Ryłko W., 2004. Karpaty. W: Sokołowski S. (Ed.), *Budowa geologiczna Polski, t. 1: Stratygrafia, cz. 3a: Kenozoik, paleogen, neogen*, Państwowy Instytut Geologiczny, 271–323.

Stefaniuk M. (kier.), 2010. *Opracowanie nowatorskich metod wykrywania złóż węglowodórów oraz rozpoznawania struktury i zmienności złóż w trakcie ich eksploatacji za pomocą kompleksu głębokich i średniozasiegowych badań elektromagnetycznych*. Realizacja 2007–2010 (um. AGH nr 17.17.140.621), Projekt rozwojowy 13102.

Wdowiarz S., 1953. Geologia fałdu Grabownicy. *Biuletyn Instytutu Geologicznego*, 120, 1–94.

Wdowiarz S., 1985. Niektóre zagadnienia budowy geologicznej oraz ropo- i gazonośności Centralnego Synklinorium Karpat w Polsce. *Biuletyn Instytutu Geologicznego*, 350, 5–52.

Zwoliński P., 2010. *Komputerowy model przestrzenny południowo-wschodniego fragmentu fałdu Grabownicy, jednostka śląska*. Archiwum KSE (praca magisterska).

Summary

The Grabownica Fold is located in the zone of the frontal uplift of the Silesian Nappe (Fig. 2). It stretches over more than ten kilometers in the NW-SE direction in the Brzozów – Sanok region. Between the two World Wars in the area of Grabownica intense petroleum exploration was conducted. In the years 1939–1953 those operations led to building and development of oil mines that have been producing oil up to the present. Results from drilling enabled relatively detailed determination of stratigraphy (Fig. 1) and tectonics of the fold core (Jaskólski 1931, Bujalski & Obtulowicz 1931, Obtulowicz 1933, 1936, Wdowiarz 1953). The drilling operations were conducted with relatively simple methods, therefore data obtained were not precise. That research did not include seismic sections, which hampers reliable quantitative reconstruction of the geometry of folds, faults and thrusts with application of modern research techniques. Recognition of petrophysical parameters of sequences that compose the Grabownica Fold is also poor (as well quantitatively as qualitatively). It is limited to five wells (of which four are located in the western and eastern closures of the structure), with basic electric resistivity logs and radiometric logs that enable interpretation of shale content (VSH) and porosity (PHI). These geophysical curves are characterized by poor quality (Fig. 4).

In the light of the absence of new data, the geometrical framework of the 3D model has been based on the geological concept created by Wdowiarz (1953) who constructed a series of cross sections that imaged the structure of the Grabownica Fold. The cross sections were digitized by the authors, thus data were obtained for reconstruction of the configuration of geological units boundaries and NW-SE-trending faults (Fig. 3). For the geometry modeling, also the structural map of the marker top surface of the lowermost Lgota Beds was used (Fig. 3) (from Stefaniuk *et al.* 2010), which enabled reconstruction of normal faults that run perpendicularly to the fold axis (i.e. in the SW-NE direction). These data were used for construction of three structural models: the Central Model (MC), Eastern

Model (MW) and Western Model (MZ) (Fig. 5). The best structural resolution is secured by data from mapping in the central part of the fold, but there are not enough data for development of a parametric model there. The geometry of that region was extrapolated westwards, to the area of the Humniska Brzozów-7 and Genpeg-62 wells, where an experimental magnetotelluric profile was located (Fig. 6). It allowed to complete Western Model as structural-parametric one.

On the basis of the well logs, continuous parametric models were constructed (Fig. 7), which reflect variability of clay content (VCL), porosity (PHI), spontaneous potential (PS), and resistivity (RT). Results of the continuous and discrete modeling allowed the authors to distinguish, in the Western Model, potential reservoir horizons in the Lgota Beds and Veřovice Beds.

With the use of the discussed models, derivative discrete models were constructed, which image the physical variability of the analyzed sequences subdivided into five classes. They were created with application of the Petrel software with a module named *Train Estimation Model* based on neural networks (Fig. 8).

Finally the impacts of internal architecture of stratigraphic complexes (so called layering) was briefly discussed (Fig. 9).