WYNIKI BADAŃ TEKTONICZNYCH, HISTORII TERMICZNEJ I WARUNKÓW POGRZEBANIA

Ireneusz DYRKA

ANALIZA TEMPA DEPOZYCJI ORAZ MODELOWANIE HISTORII TERMICZNEJ I WARUNKÓW POGRZEBANIA

METODY BADAŃ

Dla profilu otworu wiertniczego Terebin IG 5 przeprowadzono analizę tempa depozycji materiału oraz modelowania historii termicznej i warunków pogrzebania. Modelowania w wariancie jednowymiarowym (1D) wykonano za pomocą programu PetroMod 1-D firmy Schlumberger. Modelowania wykonano na podstawie danych wejściowych, takich jak: stratygrafia, litologia, miąższość jednostek wydzielonych w profilu oraz parametry petrofizyczne skał. Każdej jednostce stratygraficznej przypisano wiek liczbowy na podstawie danych Gradsteina i in. (2012). Modelowania przeprowadzono metodą wprost (ang. *forward modelling*), w której założono stan wyjściowy systemu oraz określony proces, a następnie wyliczano jego skutek dla współczesnego rozkładu stopnia dojrzałości termicznej w profilu otworu. W przypadku niezgodności między dojrzałością obliczoną a pomierzoną w profilu otworu procedura była powtarzana aż do optymalnej kalibracji modelu. Analizowano również inne modele o podobnej kalibracji. Dojrzałość termiczną materii organicznej obliczono za pomocą algorytmu opracowanego przez Sweeneya i Burnhama (1990). W rekonstrukcji historii pogrążania zastosowano poprawkę na dekompakcję. W procedurze dekompakcji uwzględniono takie parametry petrofizyczne skał, jak: współczynniki kompakcji i porowatości pierwotne utworów. Parametry te były przyjmowane dla poszczególnych typów litologicznych w miarę dostępnych danych publikowanych lub z biblioteki programu. W procedurze odtwarzania historii termicznej i warunków pogrzebania rekonstruowano miąższości zerodowanych fragmentów profili litostratygraficznych. Dotyczyło to zwłaszcza erozji utworów późnego dewonu oraz późnego karbonu (pensylwanu). Miąższości zerodowanych utworów określono na podstawie ekstrapolacji miąższości z obszarów o pełniej zachowanych profilach oraz poprzez kalibrację profili dojrzałości termicznej, pomierzonej i obliczonej. Kalibrację modeli historii termicznej przeprowadzono głównie na podstawie średniej wartości refleksyjności witrynitu i macerałów witrynitopodobnych, określonych w próbkach utworów od dewonu do karbonu (Grotek, ten tom). W modelowaniach uwzględniono dane charakteryzujące współczesny reżim cieplny (Plewa, 1994; Karwasiecka, Bruszewska, 1997; Szewczyk, Gientka, 2009), uzyskane w wyniku wykonania pomiarów temperatury w odwiertach i przewodności cieplnej szkieletu ziarnowego. Ponadto w modelowaniach uwzględniono zmiany średniej temperatury powierzchniowej w historii geologicznej basenu (Wygrala, 1989), której wartości znajdowały się w bibliotece programu.

ANALIZA TEMPA DEPOZYCJI

W strefie lokalizacji otworu Terebin IG 5 występują nałożone na siebie utwory trzech basenów sedymentacyjnych, różniących się ramami geometryczni oraz mechanizmami subsydencji (Poprawa, 2012a): basen ediakarsko-dolnopaleozoiczny, dewońsko-karboński oraz permsko-mezozoiczny basen polski. Dla tego obszaru prace w zakresie analizy tempa depozycji materiału osadowego oraz modelowania historii termicznej i warunków pogrzebania zawarto w pracach: Maćkowskiego (1997), Burzewskiego i in. (1998), Narkiewicza i in. (1998), Poprawy i Pacześnej (2002), Botora i in. (2002), Karnkowskiego (2003), Poprawy i Żywieckiego (2005) oraz Poprawy (2012a, b).

Najstarszymi utworami w profilu otworu Terebin IG 5 są utwory klastyczne ediakaru (piaskowce, mułowce, iłowce), których tempo depozycji było niewielkie i wynosiło ok. 3 m/mln lat (fig. 43). Wczesno- i środkowokambryjską fazę rozwoju basenu charakteryzowało stosunkowo wysokie tempo depozycji osadów klastycznych, które wy-

nosiło ok. 19–26 m/mln lat. Wysokie tempo depozycji osadów było związane z fazą ryftowania w ediakarze. Wraz z początkiem ordowiku po okresie erozji w późnym kambrze tempo depozycji osadów klastyczno-węglanowych wyraźnie spadło i wynosiło w ordowiku ok. 1–12 m/mln lat. Wyraźny spadek sedymentacji osadów prawdopodobnie był wynikiem subsydencji termicznej związanej z rozwojem pasywnego brzegu kontynentalnego w późnym kambrze i ordowiku.

Z początkiem syluru obserwuje się konsekwentny wzrost sedymentacji osadów klastycznych. W wenloku tempo depozycji wynosiło ok. 44 m/mln lat, w ludlowie ok. 177 m/mln lat, a w przydolu ok. 203 m/mln lat. Wzrost tempa depozycji osadów wiązał się z jednej strony z fleksuralnym uginaniem krawędzi płyty, tworzącym w basenie przestrzeń akomodacyjną, z drugiej zaś strony ze wzrostem dostawy materiału detrytycznego (Poprawa, 2012a).

Z początkiem dewonu tempo sedymentacji osadów klastycznych zmniejszyło się co najmniej o połowę w stosunku do przydolu i wynosiło ok. 105–110 m/mln lat. W środkowym dewonie zaznaczył się już wyraźny spadek tempa depozycji osadów klastyczno-węglanowych, które wynosiło ok. 15 m/mln lat. Późny dewon charakteryzował się raptownym przyspieszeniem tempa subsydencji we franie (Narkiewcz i in., 1998). Tempo depozycji materiału w tym okresie wynosiło ok. 34 m/mln lat i było związane z transtensyjną aktywnością tektoniczną (Narkiewicz i in., 1998). Po przyspieszeniu tempa depozycji we franie uległo ono stopniowemu zmniejszeniu. Z początkiem karbonu nastąpiło zatrzymanie sedymentacji osadów, które było związane z fazą bretońską i doprowadziło do wypiętrzenia, a następnie erozji znaczącej części utworów famenu.

Kolejny etap sedymentacji utworów, w przewadze klastycznych, ale również węglanowych, rozpoczął się w późnym wizenie z tempem depozycji ok. 30 m/mln i kontynuował się do serpuchowu. Wraz z początkiem baszkiru sedymentacja osadów klastycznych wzrosła gwałtownie i wynosiła ok. 90 m/mln lat. Szybkie tempo depozycji materiału również wiązano z transtensyjną aktywnością tektoniczną (Narkiewicz i in., 1998). Od późnego pensylwanu (wizenu) rozpoczął się okres wypiętrzania, erozji, a następnie zaniku sedymentacji (hiatus). Okres hiatusu był związany z deformacjami kompresyjnymi i zakończył się w późnej jurze (Poprawa, 2012a).

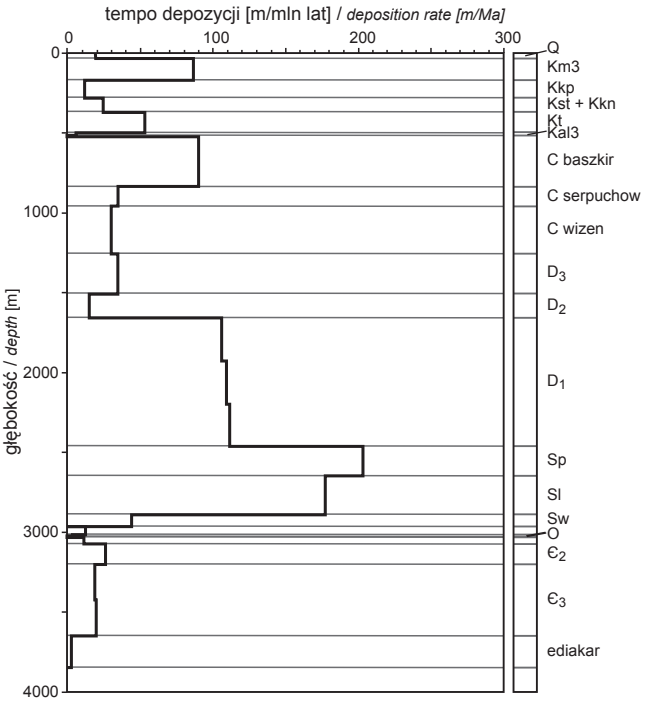


Fig. 43. Tempo depozycji osadów dla profilu otworu wiertniczego Terebin IG 5

Sediment deposition rate for the Terebin IG 5 borehole section

W profilu otworu Terebin IG 5 na częściowo zerodowanych utworach późnego pensylwanu zalegają węglanowe utwory albu i cenomanu. Z początkiem późnego albu rozpoczęła się kolejna faza aktywności tektonicznej, która trwała aż do wczesnego paleogenu. W albie i cenomanie tempo depozycji utworów węglanowych było niewielkie i wynosiło zaledwie 1–6 m/mln lat. Od turonu do kampanu tempo depozycji konsekwentnie malało. W turonie wynosiło ok. 53 m/mln lat w santonie i koniaku ok. 25 m/mln lat, a w kampanie ok. 12 m/mln lat. W mastrychcie tempo sedymentacji osadów wyraźnie wzrosło i wynosiło ok. 87 m/mln lat, a jego wzrost był związany z reaktywacją tektoniczną w basenie polskim. W kenozoiku sedymentacja osadów była nieznaczna i odbywała się tylko w czwartorzędzie.

MODELOWANIE HISTORII TERMICZNEJ I WARUNKÓW POGRZEBANIA

Dla profilu otworu Terebin IG 5 wykonano jednowymiarowe modelowania i rekonstrukcję historii termicznej oraz warunków pogrzebania (fig. 44). Podstawowym celem analizy było odtworzenie warunków paleotermicznych oraz stopnia pogrzebania skał w basenie. Do kalibracji modelu wykorzystano wyniki 29 pomiarów dojrzałości termicznej (fig. 45) wykonanych na próbkach skał pochodzących z profilu otworu (Grotek, ten tom). Pomiary obejmują interwał od ediakaru po karbon (baszkir) i stanowią względnie równomierny i dość dobrze zagęszczony rozkład w profilu. Zróżnicowana jakość kalibracji powoduje, że model historii termicznej nie jest jednoznaczny i są możliwe inne rekonstrukcje.

Gęstość współczesnego strumienia cieplnego dla otworu Terebin IG 5 obliczono na podstawie wartości temperatur odczytanych z map współczesnych temperatur na powierzchniach ścięć poziomych (Karwasiecka, Bruszewska, 1997; Szewczyk, Gientka, 2009) i/lub termogramu otworowego. Ponieważ nie dysponowano pomiarami laboratoryjnymi przewodnictwa cieplnego skał z profilu otworu,

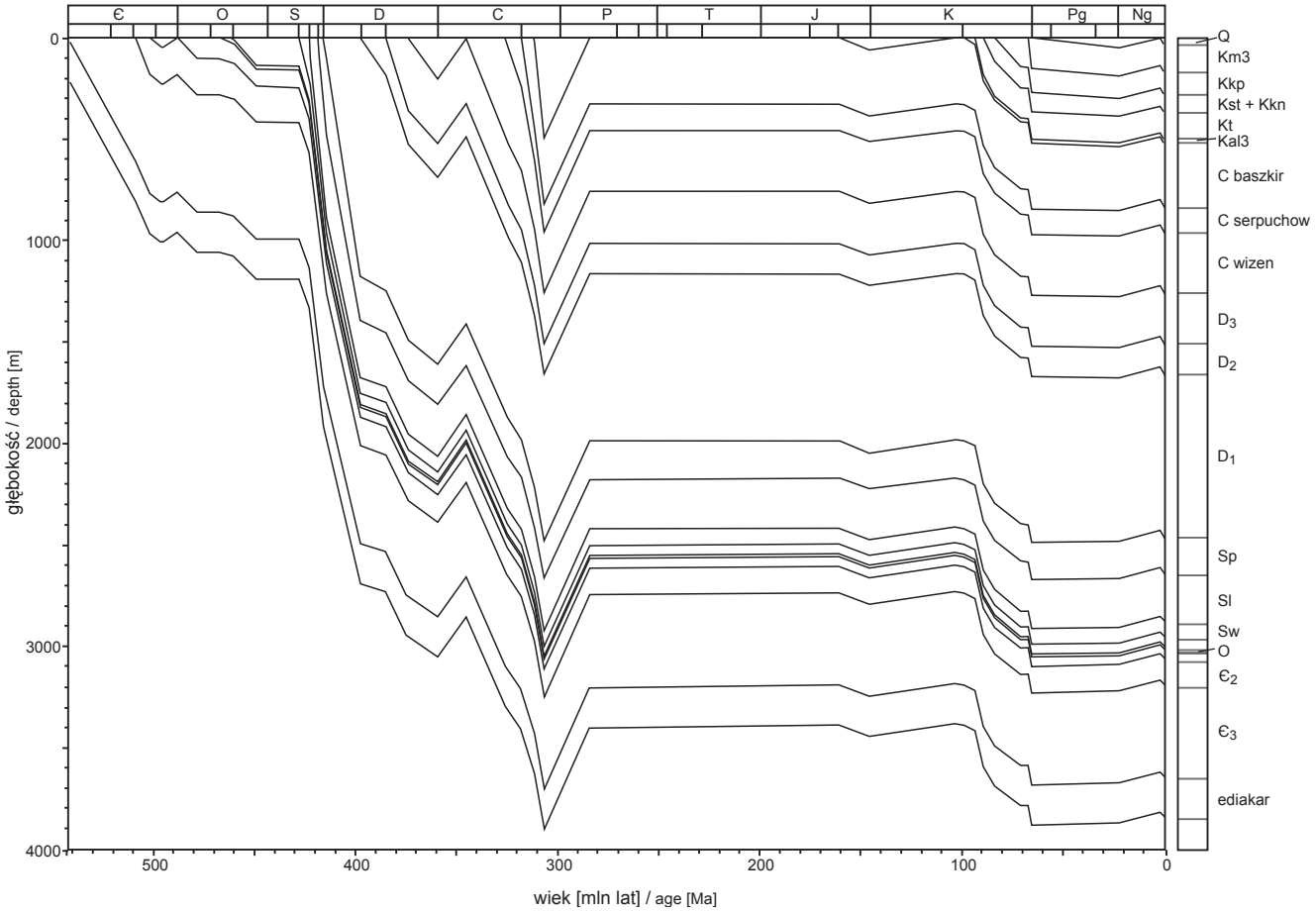


Fig. 44. Historia pogrzebania utworów w profilu otworu wiertniczego Terebin IG 5

Burial history for the Terebin IG 5 borehole section

to wartości te dla wydzielonych typów litologicznych zostały przyjęte z biblioteki programu. Obliczony współczesny strumień cieplny wynosi 37 mW/m^2.

Miąższości erozyjnie usuniętych utworów, zwłaszcza utworów dewonu górnego (famenu), gdzie przyjęto 200 m oraz utworów pensylwanu górnego, gdzie przyjęto 500 m, odtworzono na podstawie ekstrapolacji miąższości z obszarów o pełniej zachowanych profilach oraz poprzez kalibrację profili dojrzałości termicznej pomierzonej i obliczonej. Do odtworzenia paleomiąższości wykorzystano prace Marka i in. (1997), Narkiewicza i in. (1998) oraz Modlińskiego i in. (2010). Pozostałe fazy erozji, jak te dla utworów późnego kambru, późnej jury oraz paleogenu i neogenu były nieznaczne i nie miały wpływu na jakość modelu.

Profil otworu Terebin IG 5 charakteryzuje obecność kilku faz zwiększonego pogrzebania i szybkiego tempa depozycji materiału. Po okresach wzrostu szybkiego pogrzebania, bezpośrednio miały miejsce okresy erozji lub stagnacji. Pierwszym okresem wzmożonej depozycji i szybkiego pogrążania był okres od ediakaru do późnego kambru. W okresie tym pokrywa osadowa osiągnęła miąższość ok. 1000 m. Z początkiem ordowiku do końca landoweru miał miejsce okres niewielkiego pogrzebania. Wraz z początkiem wenloku nastąpiła faza bardzo gwałtownego pogrzebania, która kontynuowała się do końca dewonu. Okres ten zwiększył miąższość pokrywy osadowej do ok. 3000–3100 m.

Z końcem dewonu oraz we wczesnym karbonie nastąpiła faza wypiętrzania i erozji utworów famenu o miąższości ok. 200 m, która była związana z fazą bretońską. Następnie, w późnym wizenie, nastąpiła kolejna faza szybkiego pogrzebania, która trwała niemal do końca karbonu (westfalu). Jak wynika z modelowania historii pogrążania to wtedy została osiągnięta maksymalna głębokość pogrzebania na tym obszarze, wynosząca ok. 3900 m. Z końcem karbonu (stefan) i początkiem permu nastąpiła kolejna faza wypiętrzania i erozji o znaczących rozmiarach. Zerodowanych zostało wówczas ok. 500 m utworów westfalu.

Okres od wczesnego permu do późnej jury był pozbawiony sedymentacji osadów. W mezozoiku dwie fazy pogrzebania obejmują późną jurę, po której we wczesnej kredzie nastąpił okres erozji oraz późną kredę, kiedy to pokrywa osadowa osiągnęła wielkość pogrzebania zbliżoną do tej z końca karbonu. W kenozoiku nastąpił okres stagnacji i zaniku sedymentacji osadów wraz z niewielką fazą erozji na początku miocenu.

Wykonane różne warianty modelowań historii termicznej potwierdziły założenia Poprawy (2012b), że aby uzyskać odpowiednią, najbardziej prawdopodobną kalibrację modelu należy założyć stały w czasie strumień cieplny oraz dodatkową dostawę energii cieplnej do kompleksu utworów górnokredowych i/lub paleoceńskich w okresie ich depozycji. Dodatkowa energia cieplna w tym wypadku wyniosła 800 μW/m³. Jako potencjalny mechanizm dostarczania energii cieplnej do kompleksu utworów górnokredowych można wskazać migrację w obrębie tych utworów gorących roztworów (Poprawa, Żywiecki, 2005; Poprawa, 2012b). Takie założenia pozwalają na przyjęcie erozji utworów westfalu w wysokości ok. 500 m, co jest wartością zbliżoną do obszarów, w których występuje profil tych utworów. Założona erozja utworów dewonu górnego w wysokości 200 m nie miała znaczącego wpływu na kalibrację modelu.

Należy podkreślić, że opisany powyżej model nie jest jednoznaczny, a kalibracji modelu można dokonać w różnych innych wariantach przedstawionych w pracy Poprawy (2008) lub Kosakowskiego i in. (2005). Jednak pozostałe warianty są mniej prawdopodobne.

Na podstawie wyników modelowań można określić strefy faz generacyjnych węglowodorów oraz śledzić to zjawisko w czasie. Na podstawie wyników modelowania jednowymiarowego dla otworu Terebin IG 5 w strefie generowania węglowodorów znajdują się utwory od dolnej części profilu otworu (ediakar) do utworów wczesnej kredy włącznie. Utwory od dolnej części wenloku do ediakaru znajdują się w oknie generowania gazu ziemnego. Generowanie gazu ziemnego z tych utworów rozpoczęło się najprawdopodobniej z początkiem eocenu. Utwory od górnej części albu przez utwory karbonu i dewonu do utworów górnej części wenloku znajdują się odpowiednio we wczesnym, środkowym i późnym oknie generowania ropy naftowej. Generowanie ropy naftowej dla utworów wenloku rozpoczęło się najprawdopodobniej w wizenie i dla poszczególnych, coraz młodszych utworów następowało w młodszych okresach. Ostatnimi utworami, które osiągnęły dojrzałość do generowania ropy naftowej w eocenie, były utwory albu górnego.

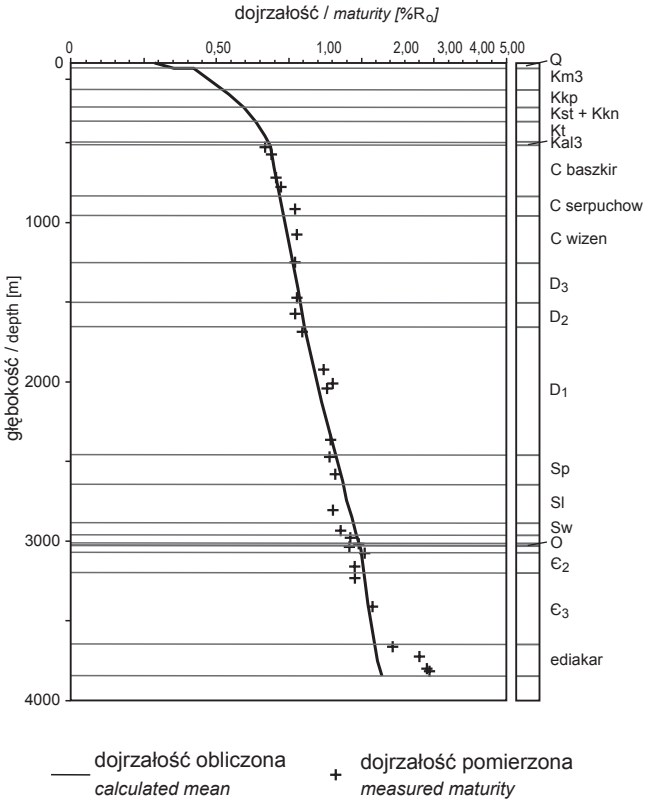


Fig. 45. Kalibracja modelu historii termicznej pomiarami dojrzałości termicznej dla profilu otworu Terebin IG 5

Calibration of thermal history model with thermal maturity measurements for the Terebin IG 5 borehole

Sylwia KIJEWSKA, Katarzyna SOBIEŃ

INTERPRETACJA DANYCH SEJSMICZNYCH

Otwór wiertniczy Terebin IG 5 jest zlokalizowany w południowo-wschodniej części regionu lubelskiego, w obrębie wyniesionej części kratonu wschodnioeuropejskiego (Żelichowski, 1972; Narkiewicz, Dadlez, 2008) i jest jednym z nielicznych otworów w rejonie nawiercających utwory ediakaru. W otoczeniu otworu zostały pomierzone dane sejsmiczne 2D, głównie w latach 80. oraz 90. XX w.

Interpretowana linia sejsmiczna profilu 10-5-90K jest dobrej jakości, choć na końcach profilu sygnał uległ znacznemu osłabieniu. Profil otworu Terebin IG 5 pozwolił na identyfikację stratygraficzną głęboko zalegających horyzontów sejsmicznych (fig. 46). Do korelacji wszystkich wyznaczonych horyzontów, stropu: ediakaru, kambru, syluru wraz z ordowikiem, dewonu dolnego, środkowego i górnego, karbonu (powierzchnia niezgodności) oraz jury, wykorzystano syntetyczną krzywą akustyczną. Analiza wykazała wyraźne zapadanie utworów ediakarskich oraz dolnego paleozoiku, a także wzrost miąższości utworów dewonu dolnego ku SE. Strop utworów syluru wyznaczono hipotetycznie, ze względu na zbyt mały kontrast impedancji akustycznej z nadległymi osadami dewonu. Słabsza ciągłość głęboko zlokalizowanych horyzontów sejsmicznych spowodowała, że wyznaczenie poddewońskich nieciągłości również jest hipotetyczne (linie żółte przerywane), a jednoznaczne określenie kinematyki uskoków jest niemożliwe.

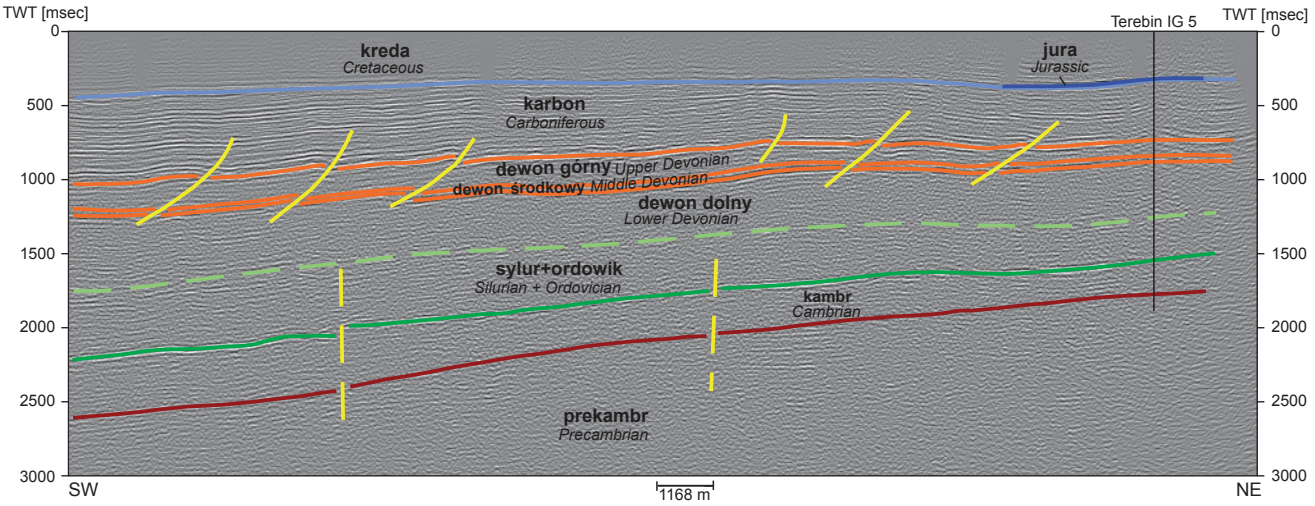


Fig. 46. Zinterpretowany fragment profilu sejsmicznego 10-5-90K

A part of interpreted seismic profile 10-5-90K

W obrębie kompleksu osadów dewonu i karbonu jakość rejestracji sejsmicznej jest wystarczająca do bardziej szczegółowej interpretacji struktur tektonicznych. Wyróżniono tu liczne uskoki odwrócone zapadające na SW, z których większość jest zakorzeniona w górnych partiach utworów dewonu dolnego. Ich powstanie jest wiązane z inwersją basenu lubelskiego (Krzywiec, 2007). Zdaniem Narkiewicza i in. (2007), co najmniej od końca westfalu panował tu reżim transpresyjny, co ma swoje odzwierciedlenie w inwersyjnym charakterze występujących tu struktur.