

ANALIZA TEMPA DEPOZYCJI ORAZ MODELOWANIE HISTORII TERMICZNEJ I WARUNKÓW POGRZEBANIA

METODY BADAŃ

Dla profilu otworu wiertniczego Lębork IG 1 przeprowadzono analizę tempa depozycji materiału osadowego oraz modelowania historii termicznej i warunków pogrzebienia. Modelowania w wariantcie 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 pograżania zastosowano poprawkę na dekompakcję. W procedurze dekompakcji uwzględniono takie parametry petrofizyczne skał jak: współczynniki kompaktacji 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 pogrzebienia rekonstruowano miąższości zerodowanych fragmentów profili litostratygraficznych. Dotyczyło to zwłaszcza erozji części utworów przydolu, utworów dewonu i karbonu oraz jury środkowej i górnej. Miąższości zerodowanych utworów określono na podstawie ekstrapolacji miąższości z obszarów o pełniej zachowanych profilach oraz przez kalibrację profili dojrzałości termicznej, pomierzonej i obliczonej. Kalibrację modeli historii termicznej przeprowadzono głównie na podstawie średniej wartości refleksyjności witrynu i macerałów witrynitopodobnych ($%R_o$), określonych w próbkach z utworów od ordowiku (karadoku, piętra globalne sandb, niższy kat) do triasu dolnego (Grotek, ten tom) oraz dodatkowo weryfikowano wyniki kalibracji wybranymi wartościami T_{max} , pomierzonymi podczas analizy Rock-Eval (Janas, ten tom). W modelowaniach uwzględniono dane charakteryzujące współczesny reżim cieplny (Plewa, 1994; Karwasiecka, Bruszezewska, 1997; Szweczyk, Gientka, 2009), tj. pomiary temperatury w otworach wiertniczych, przewodności cieplne szkieletu ziarnowego oraz pomiary gęstości powierzchniowego strumienia cieplnego. Ponadto w modelowaniach uwzględniono zmiany średniej temperatury powierzchniowej w historii geologicznej basenu (Wygrala, 1989), której wartości znajdowały się w bibliotece programu.

WYNIKI

W strefie lokalizacji otworu Lębork IG 1 występują nałożone na siebie utwory dwóch basenów sedymentacyjnych – ediakarsko-wczesnopaleozoicznego basenu bałtyckiego oraz permsko-mezozoicznego basenu polskiego. Baseny te w skałi czasu geologicznego różnią się ramami geometrycznymi, mechanizmami subsydencji oraz tempem depozycji osadów. Dla tego obszaru i pobliskich głębokich otwo-

rów wiertniczych (m.in. Darżlubie IG 1, Słupsk IG 1) wykonywano już analizy tempa depozycji materiału osadowego oraz modelowania historii termicznej i warunków pogrzebienia, które znajdują się m.in. w pracach Poprawy (2007, 2011), Poprawy i Grotek (2005), Poprawy i in. (2010) oraz Karnkowskiego (1999, 2003).

ANALIZA TEMPA DEPOZYCJI

Najstarszymi utworami w profilu otworu Lębork IG 1 są klastyczne utwory (mułowce, iłowce) ordowiku. Utwory te nie zostały w całości przewiercone, dlatego niemożliwe

jest ustalenie w miarę wiarygodnego tempa ich depozycji, jednak przez analogię do innych otworów wiertniczych (np. Darżlubie IG 1) można przypuszczać, że było ono

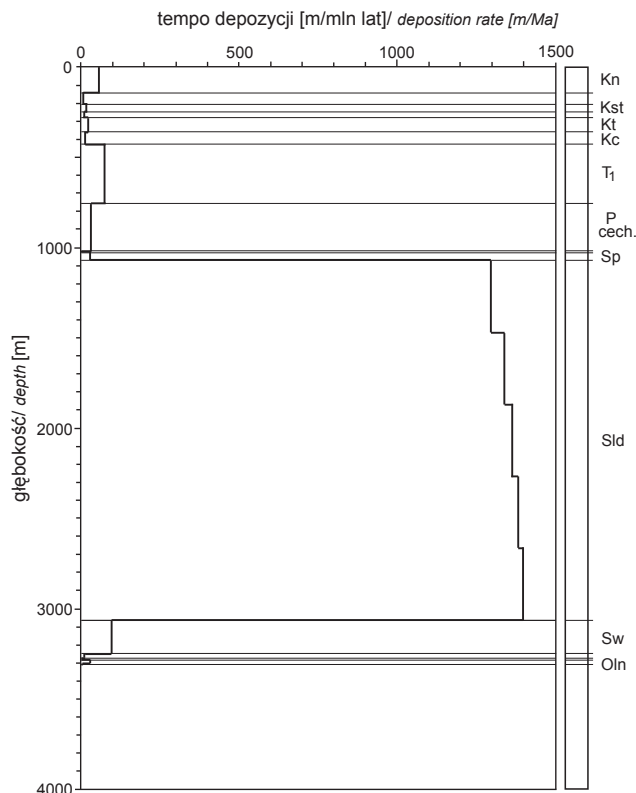


Fig. 50. Tempo depozycji osadów dla profilu otworu wiertniczego Lębork IG 1

Sediment deposition rate for the Lębork IG 1 borehole section

niskie i wynosiło ok. 5–6 m/mln lat (fig. 50). Niskie tempo depozycji osadu w późnym kambrze i z początkiem ordowiku determinowała subsydencja termiczna związana z rozwojem pasywnego brzegu kontynentalnego. W karadoku (sandbie–niższym kacie) tempo depozycji wyraźnie wzrosło i wynosiło ok. 28 m/mln lat, natomiast w późnym ordowiku znowu spadło do ok. 1–2 m/mln lat.

Z początkiem syluru miał miejsce wyraźny i konsekwentny wzrost sedymentacji osadów klastycznych. W landowerze tempo depozycji osadów wynosiło ok. 8 m/mln lat, w wenloku już 96 m/mln lat, natomiast w ludlowie osiągnęło maksimum – ok. 1295–1400 m/mln lat. W przydołu tempo depozycji osadów prawdopodobnie spadło, ale ze względu na znaczącą erozję tych utworów trudno jest oszacować ile dokładnie wynosiło. Wzrost tempa depozycji

osadów w sylurze wiązał się z jednej strony z powstawaniem przestrzeni akomodacyjnej w basenie w wyniku fleksuralnego uginania krawędzi płyty, z drugiej strony natomiast – ze wzmagającą się dostawą materiału detrytycznego, erodowanego z wypiętrzanej kaledońskiej przyzmy akrecyjnej, rozwijającej się wzdłuż zachodniej krawędzi kratonu (Poprawa, 2011).

Dla okresu dewońsko-karbońskiego nie analizowano tempa depozycji materiału osadowego, gdyż utwory tego wieku nie występują w profilu otworu Lębork IG 1. Utwory te prawdopodobnie zostały w całości zerodowane podczas wypiętrzenia basenu, które miało miejsce na przełomie wczesnego i środkowego dewonu oraz w późnym karbonie (westfalu).

Na znacząco zerodowanych utworach przydołu niezgodnie leżą niewielkiej miąższości utwory permu (czerwonego spągowca). Ogólnie w czasie sedymentacji czerwonego spągowca, na analizowanym obszarze, istniało paleowypiętrzenie, a sedymentacja osadów tego wieku nie występowała. Oszacowanie tempa depozycji dla tych utworów nie jest możliwe. Na utworach czerwonego spągowca leżą utwory cechsztynu, których tempo depozycji wynosiło ok. 32 m/mln lat. Wzrastające tempo sedymentacji kontynuowało się we wczesnym triasie, gdzie wynosiło ok. 77 m/mln lat. Tak duże tempo depozycji osadów cechsztynu i we wczesnym triasie jest związane ze wzmożoną subsyducją, która koreluje się z fazą tektoniczną, powszechnie obserwowaną w basenie polskim, zwłaszcza w strefie bruzdy śródpolskiej, interpretowanej jako faza synryftowa (Dadlez i in., 1995).

W czasie obejmującym pozostałą część triasu, jurę aż do późnej kredy miał miejsce okres stagnacji i braku depozycji osadów. Okres ten odpowiada poryftowej fazie subsydencji termicznej basenu polskiego.

Z początkiem późnej kredy rozpoczęła się kolejna faza aktywności tektonicznej, która trwała aż do początku paleogenu. Tempo sedymentacji w późnej kredzie było bardzo zmienne – dla cenomanu wynosiło 11 m/mln lat, następnie w turonie wzrosło do ok. 21 m/mln lat, po czym znowu spadło w koniak do 9 m/mln lat, następnie wzrosło w santonie do 16 m/mln lat i ostatecznie spadło w kampanie do 5 m/mln lat. Tak zmienne tempo depozycji osadów związane ze wzmożoną subsyducją sugeruje trwającą reaktywację tektoniczną w basenie polskim. Utwory kenozoiku kończą profil otworu Lębork IG 1.

MODELOWANIE HISTORII TERMICZNEJ I WARUNKÓW POGRZEBANIA

Dla profilu otworu Lębork IG 1 wykonano jednowymiarowe modelowania i rekonstrukcję historii termicznej oraz warunków pogrzebania (fig. 51). Podstawowym celem analizy było odtworzenie warunków paleotermicznych oraz stopnia pogrzebania skał w basenie. Do kalibracji modelu wykorzystano wyniki 25 pomiarów refleksyjności wityritu (R_o), określających dojrzałość termiczną utworów (fig. 52), wykonanych na próbkach skał pochodzących z profilu otworu (Grotek, ten tom) oraz dodatkowo wybra-

nych 10 z 80 pomiarów T_{max} , wykonanych w aparaturze Rock-Eval (Janas, ten tom). Nie wszystkie wyniki pomiarów T_{max} mogły posłużyć do kalibracji modelu, gdyż ich wysoka rozbieżność w wąskich interwałach profilu ograniczała wiarygodność. Pomiarów te obejmują okres od ordowiku po trias dolny. Wyniki stanowią względnie równomierne i dość dobrze zagęszczony rozkład w profilu otworu. Założone różne warianty erozji i strumienia ciepła, mogące prowadzić do dobrej kalibracji modelu, powodują, że

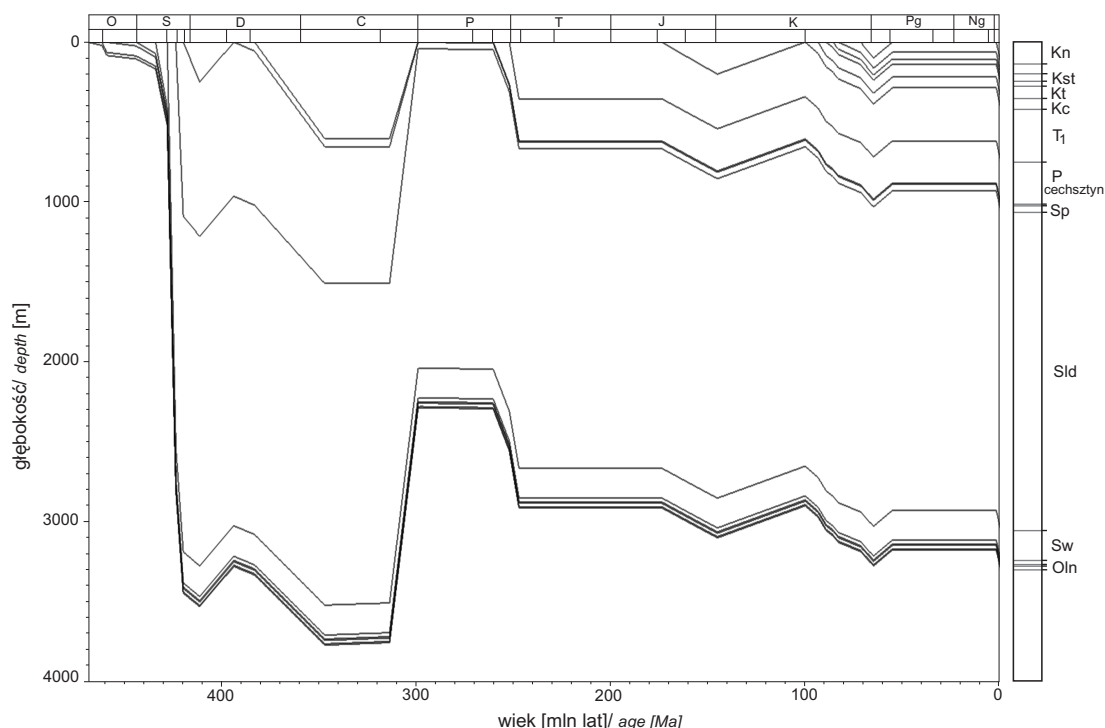


Fig. 51. Historia pogrzebania utworów w profilu otworu wiertniczego Lębork IG 1

Burial history for the Lębork IG 1 borehole section

przedstawiony w opracowaniu model historii termicznej nie jest jednoznaczny i są możliwe inne jego rekonstrukcje.

Ponieważ pomiary refleksyjności wityryny (R_D) są podstawowym parametrem określającym dojrzałość termiczną utworów, dlatego to one przede wszystkim odpowiadały za kalibrację modelu.

Gęstość współczesnego strumienia cieplnego dla otworu Lębork IG 1 obliczono na podstawie współczesnych wartości temperatur pomierzonych w górotworze (Karwasiecka, Bruszevska, 1997; Szewczyk, Gientka, 2009). Ponieważ nie dysponowano pomiarami laboratoryjnymi przewodnictwa cieplnego skał z profilu otworu, to wartości te dla wydzielonych typów litologicznych zostały przyjęte z biblioteki programu. Obliczony współczesny strumień cieplny wynosi 38 mW/m^2 .

Miąższości erozyjnie usuniętych utworów, zwłaszcza górnej części utworów przydolu, gdzie przyjęto 800 m oraz utworów dewonu i karbonu, gdzie przyjęto łącznie 900 m, odtworzono na podstawie ekstrapolacji miąższości z obszarów o pełniej zachowanych profilach oraz poprzez kalibrację profili dojrzałości termicznej pomierzonej i obliczonej. Ponadto, do odtworzenia paleomiąższości wykorzystano prace Marka i Pajchlowej (1997) oraz Modlińskiego (2010). Pozostałe fazy erozji, jak te dla utworów jury środkowej i górnej (200 m) oraz mastrychtu (100 m), były nieznaczne i nie miały wpływu na jakość modelu.

Profil otworu Lębork IG 1 charakteryzuje obecność kilku faz zwiększonego pogrzebania i szybkiego tempa depozycji materiału. Po okresach wzrostu pogrzebania, bezpośrednio miały miejsce okresy erozji lub stagnacji.

Model pograżania osadów dla otworu Lębork IG 1 rozpoczyna się w ordowiku środkowym – lanwirnie (piętro globalne darriwil). Dla obszaru basenu bałtyckiego od początku ordowiku miał miejsce okres stagnacji oraz niewielkich rozmiarów pograżanie, które kontynuowało się do późnego ordowiku – taką charakterystykę potwierdza również model pograżania analizowanego otworu. Wraz z początkiem syluru systematycznie następowała faza gwałtownego pogrzebania, z maksimum w landowerze, która kontynuowała się do wczesnego dewonu. W tym okresie miąższość pokrywy osadowej wyniosła ok. 3520 m.

W profilu otworu Lębork IG 1 nie występują utwory dewonu i karbonu oraz sugeruje się znaczącą erozję utworów przydolu. Na podstawie regionalnego modelu paleogeograficznego, bazującego na profilach ze strefy Pomorza Zachodniego oraz ze wschodniej części basenu bałtyckiego (Matyja, Poprawa, 2006) sugeruje się, że w środkowym i późnym dewonie oraz we wczesnym karbonie zachodziła dalsza faza gwałtownego pogrzebania. Pokrywa osadowa przed fazą erozji w późnym karbonie osiągnęła miąższość ok. 3760 m i była to zarazem największa głębokość pogrzebania osadów w historii pograżania dla otworu Lębork IG 1. Założono zatem całkowitą erozję deponowanych utworów dewonu i karbonu oraz znaczącej części utworów przydolu (łącznie 1700 m) z końcem karbonu, co miało związek z powaryscyjską fazą wypiętrzania i erozji.

Okres od wczesnego do późnego permu był okresem stagnacji i niewielkiej depozycji osadów. Począwszy od późnego permu, czyli depozycji osadów cechsztynu miał miejsce kolejny etap gwałtownego pogrzebania, kontynu-

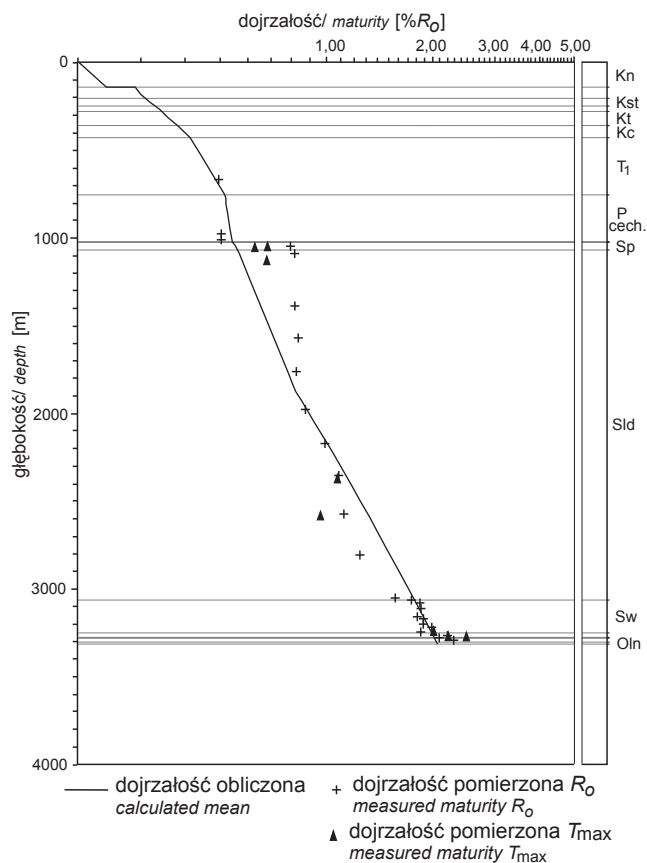


Fig. 52. Kalibracja modelu historii termicznej pomiarami dojrzałości termicznej dla profilu otworu Lębork IG 1

Calibration of thermal history model with thermal maturity measurements for the Lębork IG 1 borehole

ującego się do wczesnego triasu. Od triasu środkowego do jury środkowej miał miejsce dosyć długi okres stagnacji i braku sedymentacji osadów. W mezozoiku dwie fazy pogrzebania obejmują późną jurę, po której bezpośrednio we wczesnej kredzie nastąpił okres erozji oraz późną kredę, w której intensywna faza pogrzebania kontynuowała się do wczesnego paleogenu.

Od wczesnego paleogenu występuje okres stagnacji, a wraz z jego końcem miało miejsce niewielkich rozmiarów pograżanie, które ostatecznie ukształtowało miąższość i głębokość pokrywy osadowej w profilu otworu Lębork IG 1.

Rozkład dojrzałości termicznej (fig. 51) w obrębie utworów paleozoicznych i mezozoicznych tworzy wspólnie spójny profil o wysokim gradiencie dojrzałości. Można uznać że brak jest niezgodności pomiędzy stopniem dojrzałości utworów paleozoicznych a mezozoicznych. Anomalia związana z obniżeniem się dojrzałości termicznej w obrębie górnej części utworów ludlowu jest związana z rozwijaniem się dojrzałości w reżimie nacisków (Poprawa,

Grotek, 2005). Szybkie tempo depozycji osadów klastycznych, które miało miejsce w ludlowie oraz ich mechaniczna kompaktacja wpłynęły na tworzenie się nacisków w profilu tych utworów. Innym potencjalnym czynnikiem tworzenia się nacisków obniżających dojrzałość termiczną mogła być generacja węglowodorów z utworów macierzystych dolnego paleozoiku.

Wykonane różne warianty modelowań historii termicznej potwierdziły pogląd Poprawy i in. (2010), że aby uzyskać odpowiednią, najbardziej prawdopodobną kalibrację modelu należy założyć stały w czasie strumień ciepły równy współczesnemu (38 mW/m^2) i jego podwyższoną wartość z końcem mezozoiku do 65 mW/m^2 oraz dodatkową dostawę energii cieplnej do kompleksu utworów górnokredowych w okresie ich depozycji. Dodatkowa energia cieplna w tym wypadku wyniosła 600 μW/m^3 . Jako potencjalny mechanizm dostarczania energii cieplnej do kompleksu utworów górnokredowych można wskazać migrację gorących roztworów w obrębie tych utworów (Poprawa, Żywiecki, 2005; Poprawa i in., 2010; Poprawa 2011). Takie założenia pozwalają na realistyczne przyjęcie wielkości erozji utworów w profilu Lębork IG 1 – dla przydolu w wysokości 800 m, dewonu – 300 m oraz karbonu – 600 m. Ponadto wartości te są zbliżone do miąższości utworów w profilach tych otworów wiertniczych w których są zachowane.

Należy podkreślić, że opisany powyżej model nie jest jednoznaczny, a kalibracji modelu możemy dokonać w różnych innych wariantach. Jeden z wariantów zakładał, że jako główny czynnik wpływający na ukształtowanie się obecnie obserwowanej historii termicznej, mogło mieć waryscyjskie przegrzanie, związane z reaktywacją strefy dyslokacyjnej Teisseyre’a-Tornquist’a (Poprawa i in., 2002; Karnkowski, 2003). Inny wariant zakładał występowanie podwyższonego strumienia ciepłego w basenie bałtyckim w czasie kambryjskiej fazy ryftowej (Kosakowski i in., 1999). Warianty te są mniej wiarygodne od przyjętego, gdyż dla pierwszego niezbędne byłoby przyjęcie mało prawdopodobnej wysokiej miąższości zerodowanych utworów karbonu (2000–2500 m) oraz podwyższonego karbońskiego strumienia ciepłego do ok. 70 mW/m^2 . Natomiast drugi wariant nie miałby zasadniczego wpływu na ukształtowanie się dojrzałości termicznej utworów paleozoiku i mezozoiku.

Z otrzymanych wyników modelowań można określić strefy faz generacyjnych węglowodorów oraz śledzić to zjawisko w czasie. Na podstawie wyników modelowania jednowymiarowego dla otworu Lębork IG 1 można stwierdzić, że w strefie generowania węglowodorów znajdują się utwory od triasu dolnego do syluru (wenloku), a utwory ordowiku i landoweru znajdują się w fazie przejrzalej. Generowanie gazu ziemnego z tych utworów rozpoczęło się najprawdopodobniej w późnej kredzie. Utwory ludlowu i przydolu znajdują się w oknie generowania ropy naftowej. Początek generowania ropy naftowej dla tych utworów to schyłek syluru i początek dewonu.