

**MODEL ENTROPII
DLA WĘGLONOŚNYCH UTWORÓW KARBONU GÓRNEGO
ZAGŁĘBIA GÓRNOŚLĄSKIEGO
I PRÓBA JEGO GEOLOGICZNEJ INTERPRETACJI**

**The model of entropy for the Upper Carboniferous coal-bearing
formations in the Upper Silesian Coal Basin and an attempt
of its geological interpretation**

Marek DOKTOR & Andrzej J. KRAWCZYK

*Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska;
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków;
e-mail: doktor@agh.edu.pl, akraw@geolog.geol.agh.edu.pl*

Treść: W pracy przedstawiono model entropii dla węglonośnej sukcesji Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Tworzą ją w górnej części osady wyłącznie kontynentalne, związane ze środowiskami fluwialnymi, a w dolnej – paraliczne, gdzie obok osadów kontynentalnych występują utwory związane z szeroko pojmowaną strefą wybrzeża morskiego: przybrzeża, barier piaszczystych, plaż itp. Do badań wybrano 18 otworów wiertniczych, obejmujących swoimi profilami zarówno część kontynentalną, jak i paraliczną sukcesji węglonośnej. Dla wszystkich wyróżnionych litofacji we wszystkich profilach obliczono znormalizowaną entropię pre- i postdepozycyjną i na tej podstawie przeprowadzono klasyfikację profili. Na dendrogramie wyraźnie widać trzy grupy profili, z których pierwsza reprezentuje niemal wyłącznie osady zaliczane do serii paralicznej GZW, a druga – osady tzw. serii mułowcowej GZW. Grupa trzecia wyraźnie odbiegająca od dwóch pozostałych; reprezentowana jest przez osady zaliczane do krakowskiej serii piaskowcowej.

Słowa kluczowe: entropia, sukcesja węglonośna, górny karbon, Górnośląskie Zagłębie Węglowe

Abstract: The paper presents the model of entropy for the coal-bearing formations of the Upper Silesian Coal Basin. The coal-bearing formations include exclusively continental (fluvial) sediments in their upper parts and paralic sediments in the lower parts, the latter composed of partly continental, partly near-shore deposits laid down in broadly understood sea coast environment (shoreline, sand bars, beaches, etc.). For studies 18 boreholes were selected in which both the continental and the paralic successions were represented. For all lithofacies distinguished in all successions the normalized, pre- and post-depositional entropies were calculated. Then, successions were categorized on the basis of these calculations. The dendrogram shows three groups of successions from which the first corresponds almost exclusively to the Paralic Series and the second one – to the Mudstone Series. The third group differs distinctly from the first two groups and represents the sediments of the Krakow Sandstone Series.

Key words: entropy, coal-bearing successions, Upper Carboniferous, Upper Silesian Coal Basin

WSTĘP

Niemal zupełny brak odsłoneń powierzchniowych utworów karbonu produktywnego na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego w Polsce powoduje, że większość badań, w tym sedymentologicznych, bazuje na rdzeniach z otworów wiertniczych. Otwory pełnordzeniowane dostarczają, dzięki swojej dobrej czytelności i znacznej długości profili litologicznych, doskonałego materiału do śledzenia następstwa warstw i litofacji. Poważnym utrudnieniem jest natomiast ograniczenie obserwacji jedynie do pionowego następstwa warstw, przy braku możliwości śledzenia zmian lateralnych. Obfitość materiału rdzeniowego i związanych z nim obserwacji umożliwiła stosowanie metod matematycznych w opracowywaniu wyników. Dotychczasowe badania – zwłaszcza sedymentologiczne – zmierzające do odtworzenia warunków sedymentacji i interpretacji środowiska depozycji wykorzystywały obok obliczeń czysto statystycznych (m.in. Dembowski & Unrug 1970) głównie metody łańcuchów Markowa (por. Radomski & Gradziński 1981, Doktor *et. al.*, 1994, 1997), zmierzające do wykrycia i określenia sekwencji modelowych i modalnych, głównie w celu wykrycia cykliczności w osadach badanej sukcesji. W ostatnich latach coraz częściej, zwłaszcza w odniesieniu do osadów węglonośnych, metody łańcuchów Markowa uzupełniane są analizą entropii (np. Khan & Casshyap 1981, Hota & Maejima 2004, Tewari *et al.* 2009). Autorzy podjęli próbę określenia modelu entropii dla osadów węglonośnych Górnośląskiego Zagłębia Węglowego.

MATERIAŁY

Osady węglonośnej sukcesji Górnośląskiego Zagłębia Węglowego reprezentują molasowe wypełnienie fleksuralnego obniżenia przedgórskiego, rozwiniętego na przedpolu morawsko-śląskiej strefy orogenu waryscyjskiego (Kotas 1985). Sukcesja osiąga nieco ponad 8 tys. metrów miąższości i składa się z osadów klastycznych, w obrębie których występują liczne pokłady węgla. Badania sedymentologiczne tej sukcesji oparte na analizie litofacjalnej, głównie na podstawie danych otworowych, uwzględniały pionowe następstwo litofacji i złożonych z nich asocjacji litofacjalnych i zmierzały do rekonstrukcji środowisk i subśrodowisk depozycji osadów klastycznych (Doktor & Gradziński 1985, 1999, Gradziński *et al.* 1995, Doktor 2007). Omawiana sukcesja składa się w górnej części z kompleksu osadów wyłącznie kontynentalnych, a w dolnej – z osadów paralicznych, gdzie obok osadów kontynentalnych występują utwory związane z szeroko pojmowaną strefą wybrzeża morskigo: przybrzeża, barier piaszczystych, plaż itp.

W celu określenia modelu entropii wybrano 18 otworów wiertniczych obejmujących swoimi profilami zarówno część kontynentalną, jak i paraliczną sukcesji węglonośnej. W analizowanych materiałach przyjęto – z uwagi na uproszczenie obliczeń – głównie wydzielenia litologiczne, wyróżniając 12 litofacji: CG – zlepieńce, SG – piaskowce zlepieńcowe, SC – piaskowce gruboziarniste, SM – piaskowce średnioziarniste, SF – piaskowce drobnoziarniste, HS – mułowce piaszczyste, HE – heterolity (skały zbudowane z wiązek lamin ilasto-piaskowcowo-mułowcowych), MU – mułowce, HM – ilowce pylaste, SH – ilowce, CS – ilowce węgliste i łupki węglowe oraz C – węgle.

METODYKA BADAŃ

Badania następstwa warstw w profilach litostratygraficznych z użyciem stochastycznego modelu procesu sedymentacji jako realizacji dyskretnego procesu Markowa (czyli łańcucha Markowa) zostały zapoczątkowane w latach 60. ubiegłego wieku (Allégre 1964, Vistelius & Faas 1965, Vistelius & Feygelson 1965, Carr *et al.* 1966, Krumbein 1967, Potter & Blakely 1967, Gingerich 1969). Od tego czasu udoskonalono ich metodykę i rozwiązano – po burzliwych nieraz dyskusjach – problemy wynikające ze specyfiki badań geologicznych (m.in. Potter & Blakely 1968, Read 1969, Türk 1979, Hiscott 1981, Powers & Easterling 1982, Yu 1984), dzięki czemu weszły one do standardu badań sedymentologicznych.

Nieco na uboczu głównego nurtu geologicznych zastosowań łańcuchów Markowa pozostaje wątek dotyczący ich entropii, poruszony już w pracy Allégre (1964), a twórczo rozwinęty i podbudowany teoretycznie przez Hattoriego (1976). Tymczasem narzędzie to ma wiele zalet, łącząc prostotę obliczeniową z intuicyjnością i efektywnością interpretacji; dlatego postanowiliśmy je wypróbować na danych pochodzących z Górnosląskiego Zagłębia Węglowego.

Jak wiadomo, następstwo warstw w dowolnym profilu litostratygraficznym, w którym wyróżniono m odmian litologicznych (litofacji L_1, L_2, \dots, L_m), można przedstawić w formie kwadratowej macierzy

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdot & f_{1j} & \cdot & f_{1m} \\ f_{21} & f_{22} & \cdot & f_{2j} & \cdot & f_{2m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ f_{i1} & f_{i2} & \cdot & f_{ij} & \cdot & f_{im} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ f_{m1} & f_{m2} & \cdot & f_{mj} & \cdot & f_{mm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

której każdy wiersz i każda kolumna odpowiada jednej spośród rozróżnianych odmian litologicznych, a każdy element f_{ij} jest równy liczbie sytuacji, w których warstwa litofacji L_j występuje w profilu bezpośrednio nad warstwą litofacji L_i .

Z macierzy tej można obliczyć:

- macierz P , o elementach $p_{ij} = f_{ij} / \sum_j f_{ij}$ określających częstość, z jaką warstwy litofacji L_j występują w profilu bezpośrednio nad warstwami litofacji L_i ,
- macierz Q , o elementach $q_{ij} = f_{ij} / \sum_i f_{ij}$ określających częstość, z jaką warstwy litofacji L_j występują bezpośrednio pod warstwami litofacji L_i .

Na podstawie macierzy P i Q można teraz zdefiniować dla każdej litofacji:

- entropię predepozycyjną

$$E_i^{(pre)} = - \sum q_{ij} \cdot \log q_{ij} \quad (2)$$

- entropię postdepozycyjną

$$E_i^{(post)} = - \sum p_{ij} \cdot \log p_{ij} \quad (3)$$

Entropia predepozycyjna przybiera wartość minimalną (równą zero), gdy dla danej litofacji jeden z elementów i -tego wiersza macierzy Q jest równy 1 (co oznacza, że pozostałe elementy tego wiersza są równe 0), zaś wartość maksymalną (równą $-\log(1/m)$), gdy wszystkie elementy i -tego wiersza są sobie równe. Innymi słowy, zerowa wartość predepozycyjnej entropii dla litofacji L_i wskazuje, że warstwy tej litofacji są zawsze podścielone warstwami innej, konkretnej litofacji L_j . Im większa entropia predepozycyjna, tym większe zróżnicowanie warstw leżących bezpośrednio pod warstwami litofacji L_i . Analogiczną interpretację ma entropia postdepozycyjna: im jest ona mniejsza, tym lepiej można przewidzieć, jaka litofacja pojawi się w profilu nad warstwami litofacji L_i .

W nawiązaniu do wcześniejszych prac Duffa *et al.* (1967), Schwarzachera (1969) i innych, Hattori (1976) wyróżnił sedimentacyjne cykle symetryczne (postaci $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \dots$) oraz cykle asymetryczne (postaci $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A \rightarrow B \dots$), a wśród tych ostatnich – dodatkowo cykle, które mogą być niekompletne od góry (np. $A \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A \rightarrow B \dots$), niekompletne od dołu (np. $B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow D \dots$) lub niekompletne z obu stron. Autor ten pokazał, że profile złożone z takich cykli można odróżnić na podstawie diagramów, przedstawiających poszczególne litofacje w układzie współrzędnych, którego osiami są entropia pre- i postdepozycyjna (Fig. 1).

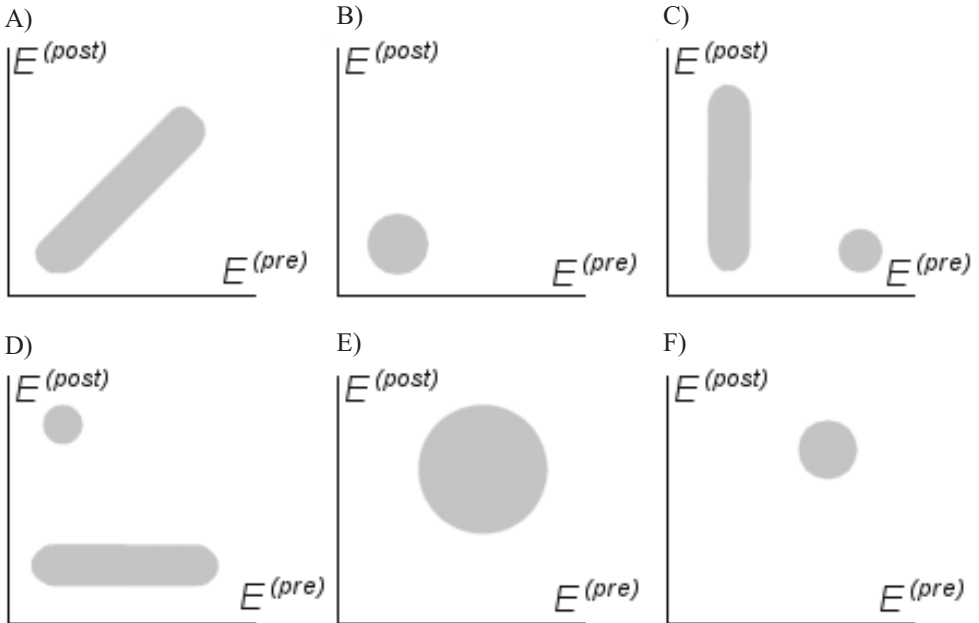


Fig. 1. Diagramy entropii litofacji dla różnych typów sedimentacji cyklicznej (wg Hattoriego 1976): A) cykle symetryczne; B) kompletne cykle asymetryczne; C) cykle asymetryczne niekompletne od góry; D) cykle asymetryczne niekompletne od dołu; E) cykle asymetryczne niekompletne z obu stron; F) sedimentacja niecykliczna

Fig. 1. Entropy diagrams of lithofacies for various types of cyclic sedimentation (after Hattori 1976): A) symmetric cycles; B) complete asymmetric cycles; C) upper truncated asymmetric cycles; D) lower truncated asymmetric cycles; E) two-side truncated asymmetric cycles; F) non-cyclic deposition

WYNIKI

Dla wszystkich litofacji we wszystkich badanych profilach obliczono znormalizowaną entropię pre- i postdepozycyjną (Fig. 2–4).

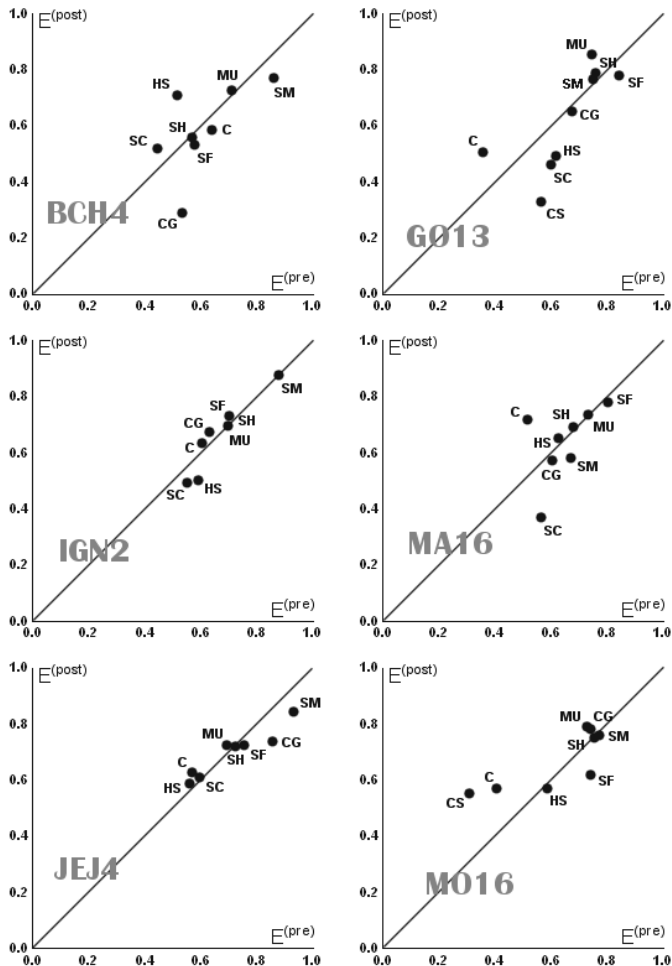


Fig. 2. Diagramy entropii litofacji dla profili serii paralicznej: CG – zlepieńce, SG – piaskowce zlepieńcowe, SC – piaskowce gruboziarniste, SM – piaskowce średnioziarniste, SF – piaskowce drobnoziarniste, HS – mułowce piaszczyste, HE – heterolity (skały zbudowane z wiązek lamin ilasto-piaskowcowo-mułowcowych), MU – mułowce, HM – ilowce pylaste, SH – ilowce, CS – ilowce węgliste i łupki węglowe, C – węgle

Fig. 2. Entropy diagrams of lithofacies for the Paralic Series: CG – conglomerates, SG – conglomeratic sandstones, SC – coarse-grained sandstones, SM – medium-grained sandstones, SF – fine-grained sandstones, HS – sandy mudstones, HE – heterolity (rocks composed of the sets of clay-sandstone-mudstone laminae), MU – mudstones, HM – silty claystones, SH – claystones, CS – coaly claystones and coaly shales, C – coals

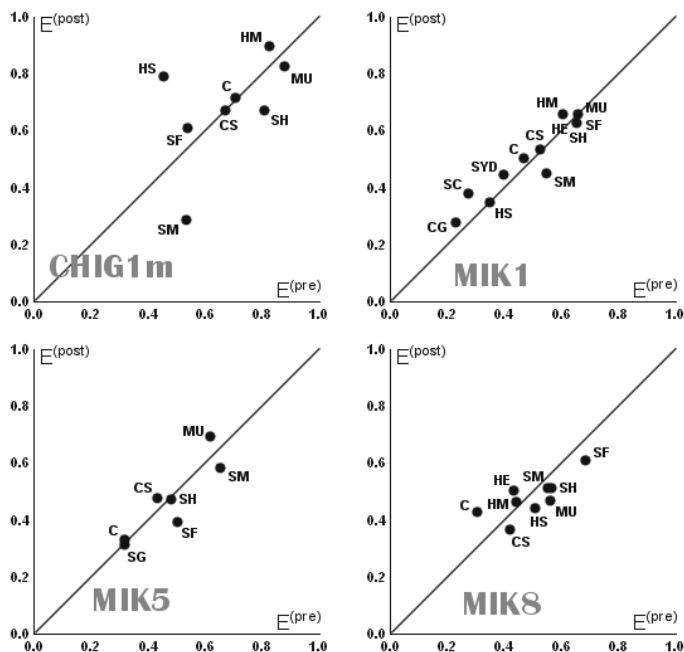


Fig. 3. Diagramy entropii litofacji dla profili serii mułowcowej. Symbole litofacji – jak na figurze 2

Fig. 3. Entropy diagrams of lithofacies for the Mudstone Series. Lithofacies symbols as in figure 2

Jak widać, typem dominującym jest entropia charakterystyczna dla sedimentacji cyklicznej o cyklach symetrycznych, aczkolwiek niektóre rozkłady mają także pewne cechy sedimentacji cyklicznej o cyklach asymetrycznych niekompletnych od góry (np. Fig. 2 – GO13, Fig. 4 – J6702), cyklach asymetrycznych niekompletnych od dołu (Fig. 2 – MO16) czy cyklach asymetrycznych niekompletnych z obu stron (Fig. 2 – BCH4, Fig. 3 – MIK8, Fig. 4 – CHIG1k).

Zwraca uwagę fakt, że entropia litofacji w serii paralicznej (Fig. 2) jest przeciętnie nieco wyższa niż w pozostałych ogniwach litostratygraficznych; zdecydowanie najniższa jest entropia litofacji serii mułowcowej (Fig. 3). Zauważalne niekiedy wyraźne odstępstwa pojedynczych litofacji od ogólnych tendencji widocznych na niektórych diagramach mogą wynikać z małej częstotliwości występowania danej litofacji w profilu, stąd ich znaczenie należy wyraźnie osłabić.

Aczkolwiek przedstawione diagramy mogą budzić pewne trudności interpretacyjne (poza niewątpliwą dominacją cykli symetrycznych), to jednak oparta na entropiach klasyfikacja badanych profili daje jednoznaczny, czytelny obraz. Na skonstruowanym metodą Warda (1963) dendrogramie, przedstawionym na figurze 5, wyraźnie widać trzy silnie zindywidualizowane grupy profili. W pierwszej znalazły się wyłącznie profile reprezentujące osady zaliczane do serii paralicznej Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Są to osady deponowane zarówno w obrębie środowisk kontynentalnych, związanych z rzekami o wysokiej krętości, jak i w środowiskach związanych z szeroko rozumianą strefą wybrzeża morskiego i płytkiego morza (Doktor & Gradziński 1999).

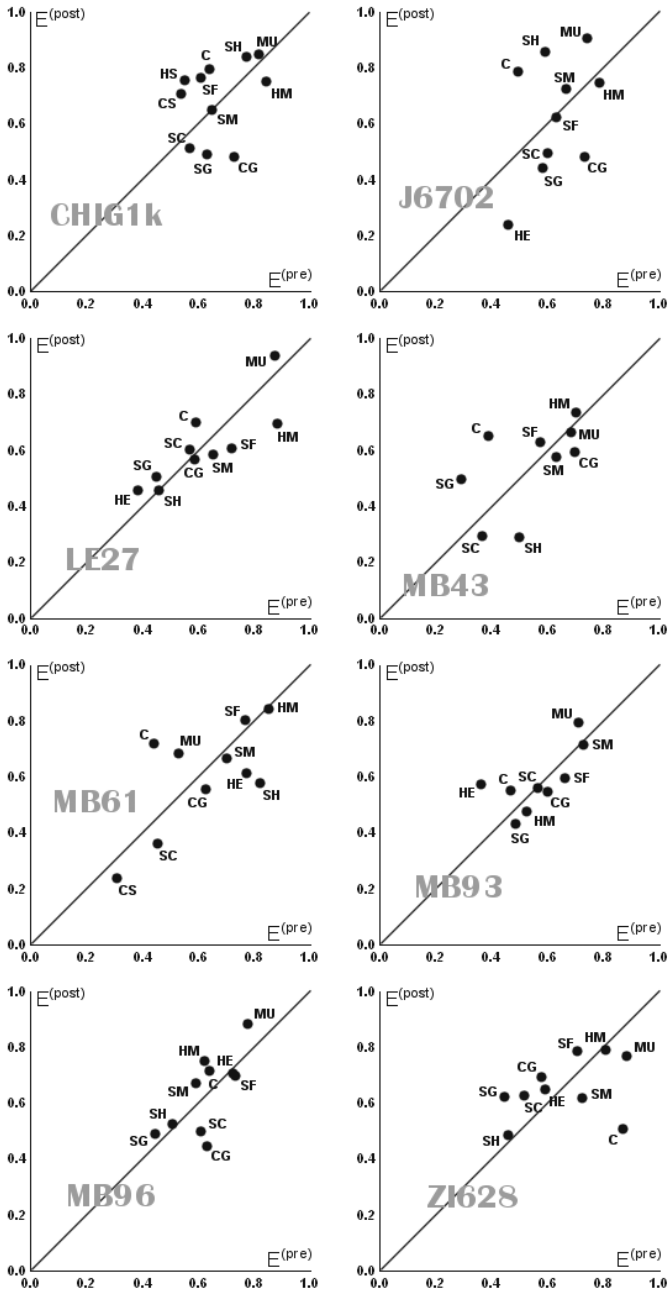


Fig. 4. Diagramy entropii litofacji dla profili krakowskiej serii piaskowcowej. Symbole litofacji – jak na figurze 2

Fig. 4. Entropy diagrams of lithofacies for the Krakow Sandstone Series. Lithofacies symbols as in figure 2

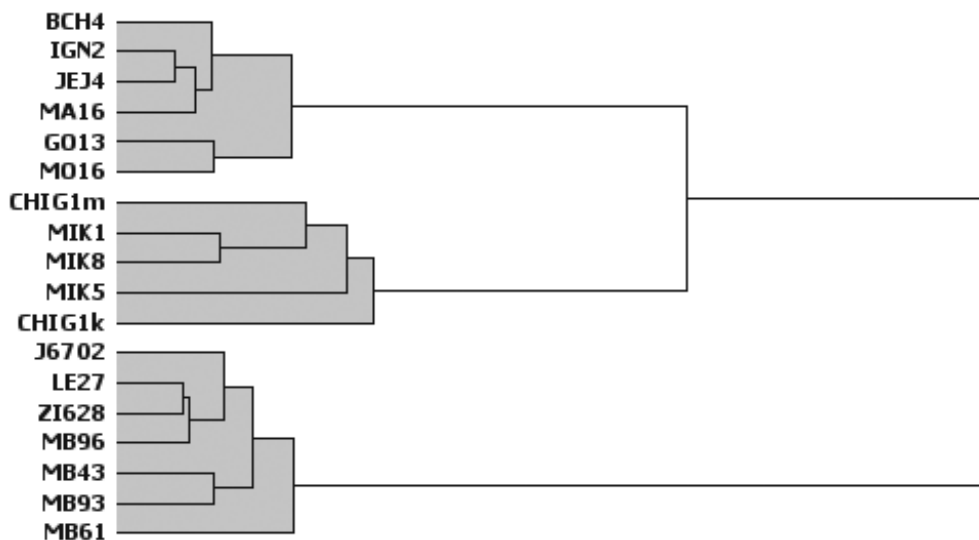


Fig. 5. Klasyfikacja badanych profili na podstawie entropii litofacji

Fig. 5. Classification of studied successions based upon the entropy of lithofacies

Grupę drugą stanowią osady reprezentujące środowiska lądowe związane z systemem rzek o wysokiej krętości, transportujących materiał głównie drobnodziarnisty i w większości w zawieszynie oraz krótkookresowych jezior związanych z równiami zalewowymi rzek meandrujących (Doktor & Gradziński 1985), zaliczane do tzw. serii mułowcowej GZW; wyjątek stanowi profil CHIG1k należący do krakowskiej serii piaskowcowej. Powiązanie tych dwóch grup wydaje się zrozumiałe, ponieważ w obszarach nadmorskich w pobliżu wybrzeża oczekiwać możemy również rzek o charakterze meandrującym. Trzecia zaznaczająca się na dendrogramie grupa wyraźnie odbiega od dwóch pozostałych. Osady reprezentujące tę grupę to utwory krakowskiej serii piaskowcowej, deponowane również w warunkach lądowych, ale przy udziale rzek o niskiej krętości (rzek roztokowych) transportujących duże ilości materiału piaszczystego (Doktor 2007).

WNIOSKI

Dominujący model entropii charakterystyczny dla symetrycznej sedymentacji cyklicznej wydaje się zrozumiały ze względu na powtarzalność warunków depozycji w środowiskach fluwialnych (riecznych). Entropia utworów zaliczanych do serii paralicznej jest wysoka i silnie zróżnicowana, co można tłumaczyć dużą różnorodnością środowisk, w których deponowane były osady. Mniejsza entropia obserwowana na diagramach reprezentujących utwory serii mułowcowej i krakowskiej serii piaskowcowej wskazuje na bardziej jednorodne lub mocniej powiązane ze sobą subs środowiska podobnego pod pewnymi względami (osady korytowe, pozakorytowe) środowiska rzeczne.

Wydaje się, że zaproponowana metoda może być pomocna w rozróżnianiu kompleksów (serii) osadów gromadzonych podobnych warunkach depozycyjnych i podobnych środowiskach, dając ilościowe podstawy interpretacji sedymentologicznych. Dalsze badania w tym kierunku wydają się obiecujące pod względem możliwości rozpoznawania pewnych odcinków sukcesji jako jednorodnych pod względem prezentowanej entropii, która – jak wynika z przedstawionych, wstępnych prób – jest charakterystyczna dla określonych środowisk sedymentacyjnych rozpoznanych w osadach górnokarbońskiej sukcesji węglowej Zagłębia.

LITERATURA

- Allégre C., 1964. Vers une logique mathématique des séries sédimentaires. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 7, 6, 214–218.
- Carr T.R., Horowitz A., Hrabar S.V., Ridge K.F., Rooney R., Straw W.T., Webb W. & Potter P.E., 1966. Stratigraphic sections, bedding sequences and random processes. *Science*, 154, 1162–1164.
- Dembowski Z. & Unrug R., 1970. Analiza statystyczna sedymentacji cyklicznej w warstwach łażiskich (Górnośląskie Zagłębie Węglowe). *Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego*, 40, 63–110.
- Doktor M. & Gradziński R., 1985. Środowisko depozycji aluwialnych utworów węglonośnych serii mułowcowej (górnym karbonem Zagłębia Górnośląskiego). *Studia Geologica Polonica*, 82, 5–67.
- Doktor M., Gradziński R. & Słomka T., 1997. Cyclicity in Upper Carboniferous coal-bearing fluvial sediments: example from the Upper Silesia, Poland. *Prace Państwowego Instytutu Geologicznego*, 157, 2, 53–61.
- Doktor M. & Gradziński R., 1999. Środowiska depozycyjne rozpoznane w serii paralicznej Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. *The 4th Czech-Polish Conference about Carboniferous Sedimentology, Ostrava, Documenta Geonica 1999*, 35–40.
- Doktor M., 2007. Conditions of accumulation and sedimentary architecture of the Cracow Sandstone Series (upper Westphalian) Upper Silesia Coal Basin, Poland. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 77, 219–268
- Duff P.McL.D., Hallam A. & Walton E.K., 1967. *Cyclic sedimentation*. Elsevier, Amsterdam.
- Gingerich P.D., 1969. Markov analysis of cyclic alluvial sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, 39, 1, 330–332.
- Gradziński R., Doktor M. & Słomka T., 1995. Depositional environments of the coal-bearing Cracow Sandstone Series (upper Westphalian), Upper Silesia, Poland. *Studia Geologica Polonica*, 108, 149–170.
- Hattori I., 1976. Entropy in Markov chains and discrimination of cyclic patterns in lithologic successions. *Mathematical Geology*, 8, 4, 477–497.
- Hiscott R.N., 1981. Chi-square tests for Markov chain analysis. *Mathematical Geology*, 13, 1, 69–80.

- Hota R.N. & Maejima W., 2004. Comparative study of cyclicity of lithofacies in lower Gondwana formations of Talchir basin, Orissa, India: a statistical analysis of subsurface logs. *Gondwana Research*, 7, 2, 353–362.
- Khan Z.A. & Casshyap S.M., 1981. Entropy in Markov analysis of late Paleozoic cyclical coal measures of east Bokaro basin, Bihar, India. *Mathematical Geology*, 13, 2, 153–162.
- Kotas A., 1985. Structural evolution of the Upper Silesian Coal Basin (Poland). *Compte Rendu 10th International Congress of Carboniferous Stratigraphy and Geology (Madrid)*, 3, 459–469.
- Krumbein W.C., 1967. FORTRAN IV computer programs for Markov chain experiments in geology. *Kansas Geological Survey Computer Contributions*, 13, 1–38.
- Potter P.E. & Blakely R.G., 1967. Generation of a synthetic vertical profile of a fluvial sandstone body. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 7, 243–251.
- Potter P.E. & Blakely R.G., 1968. Random processes and lithologic transitions. *Journal of Geology*, 76, 2, 154–170.
- Powers D.W. & Easterling R.G., 1982. Improved methodology for using embedded Markov chains to describe cyclical sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, 52, 3, 913–923.
- Radomski A. & Gradziński R., 1981. Facies sequences in the Upper Carboniferous alluvial coal-bearing deposits, Upper Silesia, Poland. *Studia Geologica Polonica*, 68, 29–41.
- Read W.A., 1969. Analysis and simulation of Namurian sediments in central Scotland using a Markov-process model. *Mathematical Geology*, 1, 2, 199–219.
- Schwarzacher W., 1969. The use of Markov chains in the study of sedimentary cycles. *Mathematical Geology*, 1, 1, 17–39.
- Tewari R.Ch., Singh D.P. & Khan Z.A., 2009. Application of Markov chain and entropy analysis to lithologic succession – an example from the early Permian Barakar Formation, Bellampalli coalfield, Andhra Pradesh, India. *Journal of Earth System Science*, 118, 5, 583–596.
- Türk G., 1979. Transition analysis of structural sequences: Discussion. *Geological Society of America Bulletin*, 90, 10, 989–991.
- Vistelius A.B. & Faas A.V., 1965. The mode of alteration of strata in certain sedimentary rock sections. *Doklady Akademii Nauk SSSR* [English trans.], 164, 40–42.
- Vistelius A.B. & Feygelson T.S., 1965. Stratification theory. *Doklady Akademii Nauk SSSR* [English trans.], 164, 20–22.
- Ward J.H., Jr., 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*, 58, 301, 236–244.
- Yu J., 1984. Tests for quasi-independence of embedded Markov chains. *Mathematical Geology*, 16, 3, 267–282.

Summary

During the last years the Markov chains method applied to the analysis of cyclicity of coal-bearing formations has been commonly supplemented with the analysis of entropy.

This method provides a simple and effective tool suitable for recognition of the character of cyclicity in coal successions (Hattori 1976 – Fig. 1). The authors attempted to construct a model of entropy for coal-bearing formations of the Upper Silesian Coal Basin (USCB), which are clastic successions hosting numerous coal seams. The coal-bearing formations are represented in the upper part by almost exclusively continental sediments laid down in fluvial environments and in the lower part by paralic sediments which include continental strata interbedded with deposits of broadly understood coastal zone (shoreline, sand bars, playas, etc.).

For studies data from 18 boreholes were selected, representing both the continental and the paralic parts of the coal-bearing formations. In such a dataset 12 lithofacies were distinguished: CG – conglomerates, SG – conglomeratic sandstones, SC – coarse-grained sandstones, SM – medium-grained sandstones, SF – fine-grained sandstones, HS – sandy mudstones, HE – heteroliths (rocks composed of the sets of clay-sandstone-mudstone laminae), MU – mudstones, HM – silty claystones, SH – claystones, CS – coaly claystones and coaly shales, and COAL – coals.

For all lithofacies in all successions the normalized, pre- and post-depositional entropies were calculated (Figs 2–4). As seen in the consecutive figures, the dominating entropy type is that typical of symmetric cycles (Figs 2–4), although distributions close to asymmetric cycles are also present: upper truncated (see e.g. Fig. 2 – GO13), lower truncated (as in Fig. 2 – MO16) and two-side truncated (see Figs 2 – MA16, 3 – MIK8, 4 – CHIK1k, ZI628).

Despite these ambiguities, categorization of studied successions based upon the entropies of distinguished facial varieties is very clear. The dendrogram (Fig. 5) clearly demonstrates three groups of successions from which the first represents almost exclusively the sediments of the Paralic Series of the USCB. These are products of both the continental environments related to strongly meandering rivers and the environments related to broadly understood coastal zone (including the shallow marine one). The second group includes sediments representing the continental environments related to strongly meandering rivers which transported mostly the fine-grained material in suspension as well as to short-living lakes related to flood plains of meandering rivers. These sediments form the so-called Mudstone Series of the USCB. Links between these two groups are obvious as meandering rivers can occur also in the coastal zone. The third group apparently differs from the former two. It represents the Krakow Sandstone Series which has been deposited in continental environments by braided rivers carrying large volumes of sand fraction.

The dominating model of entropy, typical of the cyclic sedimentation seems to be valid as fluvial environments tend to show recurrence of depositional conditions. Entropy of sediments of the first group (Paralic Series) is high and highly dispersed, which may be an effect of strong diversity of depositional environments. Distinctly lower entropies of both the Mudstone Series and the Krakow Sandstone Series indicate more homogeneous or more interrelated subenvironments where somewhat similar alluvial deposition took place (channel or overbank deposits).