

Krzysztof JAWOROWSKI

Interpretacja matematyczna następstwa osadów sylurskich w profilu Kościerzyny*

WSTĘP

Kompleks łupkowo-mułowcowy rozpoznany wierceniami w sylurze Polski północnej uznano za oddźwięk wypiętrzenia orogenu kaledońskiego pogrzebanego w podłożu Pomorza Zachodniego (H. Tomczyk, 1962; J. Znosko, 1962). Zgodnie z tym poglądem materiał mułowcowy został dostarczony do zbiornika sedymentacji z W lub SW. Badania struktur sedymentacyjnych (K. Jaworowski, 1971) świadczą, że istotnie takie kierunki transportu należy uznać za najbardziej prawdopodobne. Problem istnienia orogenu kaledońskiego w podłożu północno-zachodniej Polski znalazł wyczerpujące omówienie w pracach J. Znoski (1962, 1964, 1965), W. Pożaryskiego (1964, 1968), R. Dadleza (1967) oraz L. Tellera i K. Korrejwo (1968).

Zakończona w 1972 r. wiercenie Kościerzyna IG-1 dostarczyło nowych danych pozwalających na uściślenie poglądów dotyczących genezy sylurskiego kompleksu łupkowo-mułowcowego. Wiercenie to zlokalizowano na Pomorzu, na SW od Gdańska (fig. 1), tj. w zachodniej części polskiego odcinka syneklizy perybałtyckiej.

Łączna miąższość syluru w wierceniu Kościerzyna IG-1 wynosi blisko 2300 m, w tym 1555 m stanowi kompleks łupkowo-mułowcowy (fig. 2). Występuje on w ludlowie dolnym oraz w dolnej części ludlowu górnego (H. Tomczyk, 1973). Bliższe dane o stratygrafii syluru w Polsce północnej znajdują się w pracach H. Tomczyka (1968, 1970).

Podobnie jak w innych rejonach Niżu Polskiego, sylurski kompleks łupkowo-mułowcowy okolic Kościerzyny wykazuje znaczne podobieństwo do fliszu łupkowego. Szczególnie charakterystyczną cechą tego kompleksu jest monotonia rytmicznego następstwa łupków i różnorodnie wykształconych mułowców. Nasuwają się pytania:

* Praca stanowi rozszerzoną wersję referatu wygłoszonego w dniu 18 maja 1974 r. na Zjeździe Towarzystwa Geologicznego Niemieckiej Republiki Demokratycznej w Gera.

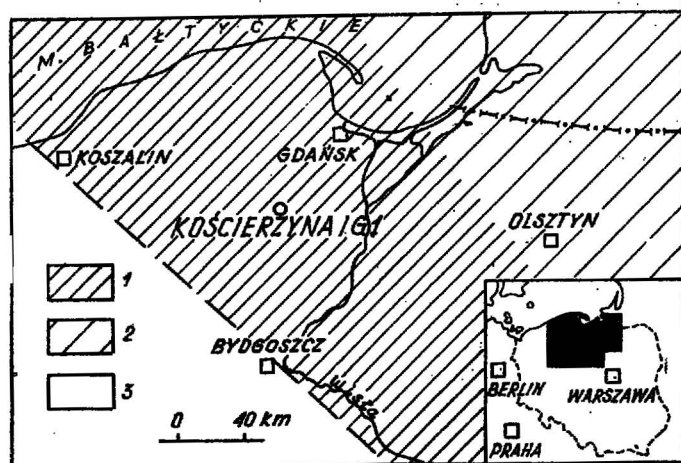


Fig. 1. Położenie otworu wiertniczego Kościerzyna IG-1 na tle mapy basenu sylurskiego w Polsce północnej
Position of the Kościerzyna IG-1 borehole on the map of the Silurian basin in northern Poland

1 — kompleks łupkowo-mułowcowy; 2 — łupki i margle;
3 — przypuszczalne obszary źródłowe materiału mułowcowego

1 — shale-siltstone complex; 2 — shales and marls;
3 — assumed source areas of siltstone material

— jakie prawidłowości kryją się za pozornym chaosem w następstwie tych osadów?

— jakie jest ich znaczenie geologiczne?

Zasadniczym celem opisanych niżej badań było znalezienie odpowiedzi na te pytania.

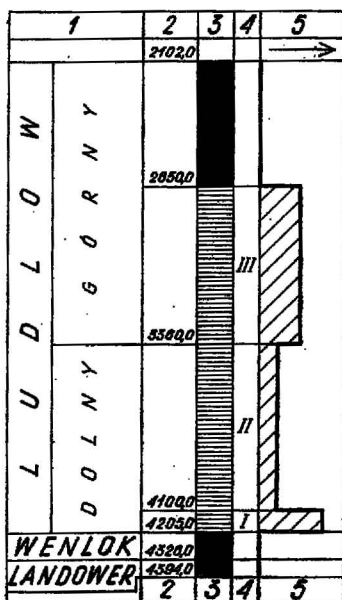


Fig. 2. Schematyczny profil syluru w otworze wiertniczym Kościerzyna IG-1

Generalized Silurian sequence in the Kościerzyna IG-1 borehole

1 — stratygrafia (według H. Tomczyka, 1973);
2 — głębokość w metrach; 3 — litologia: kolor czarny — łupki, kreski poziome — kompleks łupkowo-mułowcowy; 4 — odcinki wyróżnione w obrębie kompleksu łupkowo-mułowcowego (por. tabela 1); 5 — aktywność paleotektoniczna obszarów źródłowych materiału mułowcowego (strzałka zwrócona w kierunku wzrostu aktywności)

1 — stratigraphy (after H. Tomczyk, 1973);
2 — depth in metres; 3 — lithology: black colour — shales, horizontal lines — shale-siltstone complex; 4 — sections distinguished within the shale-siltstone complex (comp. Table 1); 5 — palaeotectonic activity of source areas of siltstone material (direction of tectonic activity increase shown by arrow)

FACJE

Wśród osadów występujących w badanym profilu wyróżniono cztery facje, z których każda pojawia się wielokrotnie. W obrębie poszczególnych facji znalazły się bądź pojedyncze warstwy, bądź ich zestawy („przekładanie”) wykazujące, obok różnic, szereg cech wspólnych. Cechy te, diagnostyczne dla danej facji, stanowią kryterium, zgodnie z którym zalicza się do niej odpowiednie fragmenty profilu. Należy wyjaśnić, że facja jest tu rozumiana jako pojęcie opisowe (por. J. M. Weller, 1960). Jest to fragment profilu jednolity ze względu na przyjęte kryterium litologiczne.

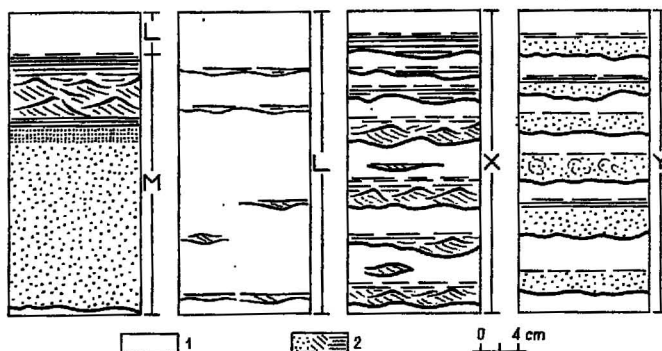


Fig. 3. Facje kompleksu łupkowo-mułowcowego
Facies of the shale-siltstone complex

Facja M reprezentowana przez ławicę mułowca ze zbiórczą sekwencją wewnątrzławicowych struktur sedimentacyjnych; szczegółowe objaśnienia w tekście; 1 — łupki; 2 — mułowce

Facies M represented by a siltstone bed with a complete sequence of internal structures; detailed explanations in the text; 1 — shales; 2 — siltstones

Facja M. Są to mułowce, niekiedy piaskowce drobnoziarniste, jasno- i ciemnoszare, o miąższości ponad 10 cm (fig. 3). Najczęściej miąższość ich waha się od 0,1 do 0,3 m i rzadko przekracza 1,0 m. Maksymalna stwierdzona miąższość facji M wynosi 2,0 m. Zarówno mułowce jasne, jak i ciemne są silnie wapniste. Barwa ciemna wiąże się ze znaczną zawartością domieszek ilastych.

Wewnętrzna struktura ławic mułowców jest dość często jednorodna. W mułowcach jasnych, ponad partiami jednorodnymi pojawia się zwykle laminacja ripplmarkowa i pozioma. Obok ławic jednorodnych licznie występują ławice w całości laminowane ripplmarkowo lub poziomo. Obu wspomnianym typom laminacji towarzyszą zaburzenia konwolutive. W mułowcach ciemnych obok struktury jednorodnej zaznaczają się także deformacje kłębiaste. W wielu ławicach mułowców, szczególnie niejednorodnych, widać wyraźną gradację ziarn osadu. Ich wielkość maleje ku górze.

Powierzchnie spągowe ławic mułowców zaznaczają się bardzo wyraźnie. Czasem widać na nich hieroglify prądowe: jamki wirowe i ślady przedmiotów.

Podane wyżej cechy mułowców świadczą, że powstały one dzięki depozycyjnej działalności prądów zawieszinowych.

Mułowce, których miąższość przekracza 1 metr występują zwykle w postaci ławic wielokrotnych, tj. powstałych w wyniku działania kilku szybko po sobie następujących prądów zawieszinowych. W ławicach wielokrotnych obserwuje się gwałtowne zmiany wielkości ziarna i struktur sedimentacyjnych. W niektórych ławicach wielokrotnych widać rozmycia lub cienkie (poniżej 0,5 cm) przewarstwienia łożca.

Facja L. Są to łupki ilaste, ciemne, prawie czarne występujące w dwóch łatwo rozpoznawalnych makroskopowo odmianach: gładkiej i szorstkiej. Miejscami pojawiają się w nich bardzo nieliczne i cienkie (poniżej 1 cm) warstwy i soczewki mułowcowe (fig. 3). Zarówno łupki gładkie, jak i szorstkie są bezwapniste i zawierają drobne kongrecje pirytu. Występują w nich graptolity, którym towarzyszą nieliczne fragmenty spłaszczonych skorup głowonogów. Jest to więc planktoniczno-nektoniczny zespół fauny charakterystyczny dla sedimentacji odległej od brzegu i prawdopodobnie głębokowodnej.

W obrębie kompleksu łupkowo-mułowcowego miąższość fragmentów profilu objętych facją L jest bardzo zmienna, dochodząca do kilku, rzadziej kilkunastu metrów.

Wspomniane wyżej łupki szorstkie zawierają znaczne domieszki materiału mułowcowego. Prawdopodobnie powstały one dzięki działalności bardzo powolnych, rozcieńczonych prądów zawieszinowych.

Zestawy występujących na przemian cienkich ławic mułowców i łupków wydzielono jako odrębne facje X i Y — w zależności od wzajemnej relacji miąższościowej tych skał oraz od strukturalnego charakteru mułowców.

Facja X. Są to bardzo cienkie ławice mułowców (zwykle od 0,5 do 3 cm) występujące na przemian z łupkami (fig. 3). Te ostatnie tworzą ławice o miąższości od 0,5 do 10 cm i często znajdują się w przewodzie.

Mułowce odznaczają się laminacją ripplemarkową i poziomą. Ich powierzchnie spągowe są nierówne — mają najczęściej wyraźnie erozyjny charakter. Dotyczy to zwłaszcza wydłużonych soczewek mułowcowych skierowanych wypukłością ku dołowi i płaskich w stropie. Są to wypełnienia niewielkich bruzd erozyjnych. Spotyka się je dość często. Obok nich występują także drobne soczewki stanowiące odosobnione ripplemarki mułowcowe. Miejscami soczewki mułowcowe są tak liczne, a dzielące je łupki tak cienkie, że strukturę skały można określić jako warstwowanie soczewkowe.

Facja Y. Są to występujące na przemian z łupkami ławice mułowców, odznaczające się równymi powierzchniami spągu i stropu (fig. 3). Miąższości mułowców i łupków są w przybliżeniu równe i wahają się od 1 do 5 cm. Miejscami zaznacza się niewielka przewaga łupków.

Ławice mułowców są zwykle jednorodne. Czasem obserwuje się w nich deformacje kłębiaste lub — w ich górnych partiach — laminację poziomą. Nie brak ławic wielokrotnych świadczących o dwu- lub trzykrotnym epizodzie sedimentacyjnym.

FACJE A SEKWENCJA STRUKTUR WEWNĄTRZŁAWICOWYCH

Sekwencja zbiorcza ilustrująca teoretyczne następstwo struktur sedymentacyjnych, jakiego należy oczekiwać, gdyby pojawiły się one wszystkie razem w jednej ławicy mułowca, jest następująca (fig. 3):

łupek	5
strop — przejście	
mułowiec: laminacja pozioma „b” (laminy jasne i ciemne)	3
laminacja ripplemarkowa	4
laminacja pozioma „b”	3
laminacja pozioma „a” (wyłącznie laminy jasne)	2
uziarnienie frakcjonalne lub struktura jednorodna	1
spąg — wyraźny.	

Sekwencja ta ustalona dla sylurskich mułowców Niżu Polskiego, w trakcie wcześniejszych badań (K. Jaworowski, 1971), znalazła pełne potwierdzenie w profilu Kościerzyny. Stosując podane wyżej symbole cyfrowe, stwierdzić można, że w facji M obserwuje się sekwencje 15; 125; 135; 435, w facji X występuje głównie sekwencja 435, rzadziej 35, a w facji Y sekwencje — 15 oraz 125 lub 135. Należy podkreślić, że przedmiotem niniejszej pracy jest następstwo opisanych poprzednio facji, a nie struktur sedymentacyjnych występujących wewnątrz pojedynczych ławic mułowców.

NASTĘPSTWO FACJI JAKO ŁAŃCUCH MARKOWA

A. B. Wistelius (1949) zaproponował, aby w analizie następstwa osadów zastosować łańcuchy Markowa. Zasady stosowania łańcuchów Markowa w badaniach geologicznych omawiają m. in. J. C. Griffiths (1966), W. C. Krumbein (1967) oraz W. Harbaugh i B. Bonham-Carter (1970). W niniejszej pracy przyjęto, że następstwo facji w profilu kompleksu łupkowo-mułowcowego jest łańcuchem Markowa pierwszego rzędu. Każda facja częściowo warunkuje rodzaj facji, która pojawia się bezpośrednio nad nią. Innymi słowy, „pamięć” procesu generującego badany profil sięgała wstecz do facji bezpośrednio poprzedzającej rozpatrywaną.

Markowski charakter następstwa osadów można sprawdzić stosując odpowiedni test statystyczny (por. P. D. Gingerich, 1969). W niniejszej pracy zabieg taki uznano za bezprzedmiotowy. Niezależnie od ewentualnego wyniku testu, przyjęcie zupełnie przypadkowego następstwa osadów byłoby geologicznie nonsensowne.

METODA

Stwierdzoną w profilu kolejność facji zapisano w formie łańcucha odpowiadających im symboli literowych (fig. 4a). Należy przy tym zwrócić uwagę, że nie notowano przejść facji samych w siebie (np. LL lub XX). Znaczne odcinki badanego profilu, niestety, nie były rdzeniowane. Z tego powodu łańcuch następstwa facji nie jest ciągły.

dzona osobno dla każdego odcinka. Granice między odcinkami można wytyczyć jedynie w przybliżeniu, ponieważ przypadają one na bezrdzeniowe partie profilu.

Miąższości, zakres rdzeniowania poszczególnych odcinków oraz całości zbadanego profilu przedstawiono w tabeli 1. Zasięg głębokościowy odcinków zaznaczono na fig. 2.

Na podstawie łańcucha następstwa facji zestawiono macierz liczebności przejść $[n_{ij}]$. Macierz ta jest tablicą o jednakowej ilości rzędów i kolumn. Każdej facji odpowiada jeden rząd i jedna kolumna. Stosując przyjęte w niniejszej pracy literowe symbole facji otrzymano macierz liczebności przejść w postaci:

$$[n_{ij}] = \begin{array}{cccc|c} & \text{M} & \text{L} & \text{X} & \text{Y} & \\ \hline & - & n_{ML} & n_{MX} & n_{MY} & \text{M} \\ & n_{LM} & - & n_{LX} & n_{LY} & \text{L} \\ & n_{XM} & n_{XL} & - & n_{XY} & \text{X} \\ & n_{YM} & n_{YL} & n_{YX} & - & \text{Y} \end{array}$$

gdzie: n_{ij} oznacza ogólnie liczebność wystąpień facji i pod facją j , np.: n_{MX} jest liczebnością przejść (do góry) facji M w fację X; kreski w przekątniowych wyrazach macierzy wynikają z faktu, że nie rozpatruje się przejść facji samych w siebie.

Sposób zestawienia macierzy liczebności przejść objaśnia przykład przedstawiony na fig. 4. Po sporządzeniu tabeli roboczej (fig. 4b) w jej „klatkach” zaznaczano kropkami wystąpienia poszczególnych facji, w zależności od tego jakie facje bezpośrednio je poprzedzały. „Współrzędne” klatki, w której stawiano każdą kolejną kropkę określała facja występująca poniżej rozpatrywanego przejścia (symbol z prawej strony tabeli) oraz facja występująca wyżej (symbol u góry tabeli). Jeśli więc, na przykład, nad facją M pojawiła się facja Y, kropkę umieszczono w ostatniej klatce górnego wiersza tabeli. Po zsumowaniu wszystkich kropek otrzymuje się macierz $[n_{ij}]$ (fig. 4c). Trzeba przy tym pamiętać o braku ciągłości łańcucha następstwa facji. Każde „przejście” od facji występującej w stropie rdzenia pobranego z większej głębokości do facji występującej w spągu rdzenia pochodzącego z mniejszej głębokości, jeśli dzieli je bezrdzeniowy fragment profilu, należy pominąć.

Liczebności przejść poszczególnych facji w inne (do góry) stanowią wektor:

$$[n_i] = \begin{bmatrix} n_M \\ n_L \\ n_X \\ n_Y \end{bmatrix}$$

gdzie: n_i oznacza liczebność wystąpień facji i poniżej innych, (jest to suma i -tego wiersza macierzy liczebności przejść) np. jeśli $i = M$, to wtedy:

$$n_M = n_{ML} + n_{MX} + n_{MY}$$

Suma wszystkich zbadanych przejść między facjami, N , wynosi:

$$N = n_M + n_L + n_X + n_Y$$

Na podstawie macierzy liczebności przejść można skonstruować diagram powiązań facjalnych („facies relationship diagram”, J. F. M. De Raaf, H. G. Reading, R. G. Walker, 1965). W niniejszej pracy, przy konstrukcji diagramów tego rodzaju ograniczono się do uwzględnienia jedynie najczęstszych przejść między odmiennymi facjami (por. R. C. Selley, 1970). Dla podkreślenia faktu, że diagramy oparte o dane z macierzy $[n_{ij}]$ wynikają z rzeczywistych, stwierdzonych w profilu liczebności przejść, będzie się je dalej określać jako rzeczywiste diagramy najczęstszych powiązań facjalnych.

Chcąc ujawnić „idealne”, pozbawione przypadkowych zakłóceń, następstwo facji posłużono się metodą zbliżoną do proponowanej przez R. C. Selley'a (1970). Autor ten obliczał macierz różnic między rzeczywistą, stwierdzoną w profilu, liczebnością przejść a liczebnościami przejść, jakich należy oczekiwać, gdyby następstwo facji było zupełnie przypadkowe. Sposób w jaki R. C. Selley (1970) obliczał liczebności przejść przypadkowych może być stosowany tylko wówczas, gdy uwzględnia się przejścia facji samych w siebie. Ponieważ przejścia tego rodzaju nie były notowane w badanym profilu, zasła konieczność zastosowania innej metody obliczeń. Podobnie jak P. D. Gingerich (1969) przyjęto, że przy zupełnie przypadkowym następstwie facji, prawdopodobieństwo wystąpienia facji j nad facją i równe jest stosunkowi liczebności wystąpień facji j do wystąpień wszystkich facji, z wyjątkiem facji i .

Można to zapisać w postaci:

$$\frac{n_j}{N - n_i}$$

Wobec tego, liczebność przejść (do góry) facji i w fację j , jeśli następstwo ich jest zupełnie przypadkowe, wynosi:

$$\frac{n_i \cdot n_j}{N - n_i}$$

I ostatecznie, różnicę m_{ij} między rzeczywistą stwierdzoną liczebnością przejść (do góry) facji i w fację j a liczebnością przejść przy ich przypadkowym następstwie, otrzymuje się z prostej formuły:

$$m_{ij} = n_{ij} - \frac{n_i \cdot n_j}{N - n_i}$$

Rezultaty wykonanych w ten sposób obliczeń, dla wszystkich możliwych przejść (do góry) odmiennych facji, zebrano w macierz $[m_{ij}]$ zwaną dalej skrótowo „macierzą różnic”. Uwzględniając najczęstsze przejścia

między odmiennymi facjami, na podstawie macierzy różnic, łatwo skonstruować pozbawiony zakłóceń przypadkowych, idealny diagram najczęstszych powiązań facjalnych.

RYTM NAJCZĘSTSZY I RYTM IDEALNY

Przez rytm rozumie się tu zespół facji występujących w określonej kolejności. Jako granicę każdego rytmu przyjęto spąg kolejnego fragmentu profilu objętego facją L. Stanowi ona stały element wszystkich rytmów.

W poszczególnych odcinkach profilu można zaobserwować rytmy powtarzające się najczęściej. Rytm ten łatwo jest ustalić na podstawie łańcucha następstwa facji. Prócz rytmów najczęstszych wyróżniono rytmy idealne, wyprowadzone z idealnych diagramów powiązań facjalnych.

Rytm idealny odznacza się następującymi cechami:

- występują w nim wszystkie facje znane w rozpatrywanym odcinku profilu;
- pojawienie się każdej facji pozostaje w związku z rodzajem facji występującej bezpośrednio niżej.

Rytm idealny odpowiada „composite sequence” P. McL. D. Duffa i E. K. Waltona (1962). Jest to twór teoretyczny, który może nie pojawić się ani razu w łańcuchu następstwa facji. Ukazuje on takie następstwo facji jakie miałyby miejsce, gdyby mogły się one wszystkie kolejno rozwinąć w jednym rytmie bez interwencji czynnika przypadkowego.

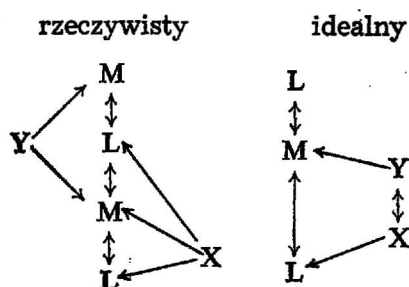
WYNIKI

Odcinek I (głębokość 4205—4100 m).

$$\begin{array}{cccc}
 & M & L & X & Y \\
 [n_{ij}] = & \begin{bmatrix} - & 32 & 11 & 11 \\ 33 & - & 12 & 5 \\ 10 & 10 & - & 6 \\ 11 & 8 & 3 & - \end{bmatrix} & \begin{array}{l} M \\ L \\ X \\ Y \end{array} & [n_i] = \begin{bmatrix} 54 \\ 50 \\ 26 \\ 22 \end{bmatrix} \\
 & N = 152 & & &
 \end{array}$$

$$\begin{array}{cccc}
 & M & L & X & Y \\
 [m_{ij}] = & \begin{bmatrix} - & 4,4 & -3,3 & -1,1 \\ 6,5 & - & -0,7 & -5,8 \\ -1,1 & -0,3 & - & 1,5 \\ 1,9 & -0,5 & -1,4 & - \end{bmatrix} & \begin{array}{l} M \\ L \\ X \\ Y \end{array} & \\
 & & & &
 \end{array}$$

Diagramy najczęstszych powiązań facjalnych:



Rytm najczęstszy: LM.

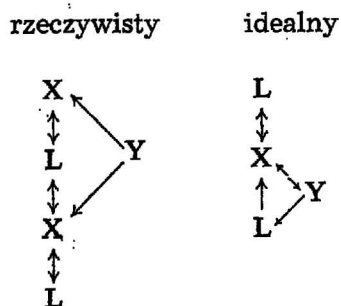
Rytm idealny: LXYM.

Odcinek II (głębokość 4100—3360 m).

$$\begin{array}{c}
 \text{L} \quad \text{X} \quad \text{Y} \\
 [n_{ij}] = \begin{bmatrix} - & 12 & 2 \\ 14 & - & 3 \\ 1 & 4 & - \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{L} \\ \text{X} \\ \text{Y} \end{array} \quad [n_i] = \begin{bmatrix} 17 \\ 5 \end{bmatrix} \\
 N = 36
 \end{array}$$

$$\begin{array}{c}
 \text{L} \quad \text{X} \quad \text{Y} \\
 [m_{ij}] = \begin{bmatrix} - & 1,2 & -1,2 \\ 1,5 & - & -1,5 \\ -1,3 & 1,3 & - \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{L} \\ \text{X} \\ \text{Y} \end{array}
 \end{array}$$

Diagramy najczęstszych powiązań facjalnych:



Rytm najczęstszy: LX.

Rytm idealny: LYX.

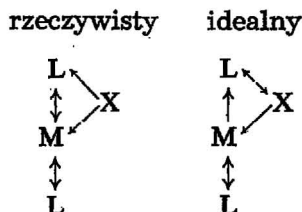
Mała liczebność zbadanych przejść między odmiennymi facjami (N) może budzić wątpliwości czy konstruowanie diagramów powiązań facjalnych jest w tym przypadku uzasadnione. Wydaje się jednak, że macierz $[n_{ij}]$ jest wystarczająco reprezentatywna. Rdzenie, na podstawie których została ona zestawiona, pobrano mniej więcej równomiernie wzdłuż całego odcinka. We wszystkich rdzeniach wystąpił ten sam, charakterystyczny dla odcinka II, zespół facji.

Odcinek III (głębokość 3360—2650 m.)

$$\begin{array}{c}
 \text{M} \quad \text{L} \quad \text{X} \\
 [n_{ij}] = \begin{bmatrix} - & 15 & 8 \\ 18 & - & 4 \\ 5 & 7 & - \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{M} \\ \text{L} \\ \text{X} \end{array} \quad [n_i] = \begin{bmatrix} 23 \\ 22 \\ 12 \end{bmatrix} \\
 N = 57
 \end{array}$$

$$\begin{array}{c}
 \text{M} \quad \text{L} \quad \text{X} \\
 [m_{ij}] = \begin{bmatrix} - & 0,1 & -0,1 \\ 3,5 & - & -3,5 \\ -1,1 & 1,1 & - \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{M} \\ \text{L} \\ \text{X} \end{array}
 \end{array}$$

Diagramy najczęstszych powiązań facjalnych:



Rytm najczęstszy: LM.

Rytm idealny: LMX.

Mimo niezbyt dużej liczebności zbadanych przejść między odmiennymi facjami, macierz $[n_{ij}]$, podobnie jak w przypadku poprzednio omówionego odcinka, można uznać za wystarczająco reprezentatywną. Odcinek III także rdzeniowano dość równomiernie. We wszystkich próbkach stwierdzono ten sam, właściwy dla niego, zespół facji.

ENERGETYCZNY SZEREG FACJI

Interpretacja wyników manipulacji matematycznych, jakim poddano łańcuch następstwa facji, wymaga ustalenia, w jakich warunkach facje te powstały. Kluczem do rozstrzygnięcia tej sprawy są wewnętrzzławiowe struktury mułowców występujących w poszczególnych facjach.

Ławice mułowców stanowiące fację M oraz przeławicenia mułowcowe facji Y świadczą o gwałtownym tempie spadku energii prądów zawiesinowych. Prędkość depozycji często była zbyt duża, aby mogły powstać struktury sedymentacyjne będące rezultatem uporządkowania materiału podczas transportu w przesłonie trakcyjnej. Innymi słowy, jednorodne ławice mułowców, charakterystyczne dla facji M i Y, wskazują na prądy zawiesinowe, które dotarły do miejsca depozycji w fazie metastabilnej (por. E. K. Walton, 1967). Mułowce obu tych facji powstały w podobnych warunkach hydrodynamicznych. Facja M reprezentuje jednak wyraźnie wyższą energię czynnika depozycyjnego. Świadczą o tym znacznie większe miąższości ławic mułowców facji M od przeławiczeń mułowcowych facji Y oraz nieco grubsze ziarno osadu (niekiedy frakcja drobnopiaszczysta) spotykane w facji M.

Przeławicenia mułowcowe facji X są przejawem niskiego tempa spadku energii prądów zawiesinowych. Ilość osadu przechodząca w jednostce czasu do przesłony trakcyjnej nie była zbyt duża. Dzięki temu, pod wpływem zachodzącego przepływu, mogły się kształtować rozmaite formy powierzchni dna, utrwalone następnie jako wewnątrzławicowe struktury mułowców. Najczęściej są to warstwowania charakterystyczne dla niskiego reżymu przepływu (laminacja ripplemarkowa, laminacja pozioma „b”). Przeławicenia mułowcowe facji X zostały złożone przez prądy zawiesinowe znajdujące się w fazie stabilnej.

Facja L, praktycznie rzecz biorąc pozbawiona przeławiczeń mułowcowych, powstała w wyniku powolnej sedymentacji zawiesiny ilastej, obejmującej rozległe obszary zbiornika. Ten typ sedymentacji można traktować jako proces ciągły. Zachodził on zarówno w czasie działania prądów zawiesinowych, jak i w przerwach między nimi. Właśnie dlatego facja L stanowi element wszystkich rytmów, a dolne granice fragmentów profilu objętych tą facją uznano za granice rytmów.

Omawiane facje można uporządkować w następujący szereg energetyczny (energia czynnika depozycyjnego maleje w prawo): facja M — facja Y — facja X — facja L.

INTERPRETACJA

Zakładając markowski model następstwa facji należy rozstrzygnąć kwestię, z czym wiążą się istniejące w nim prawidłowości. W niniejszej pracy przyjęto, że stanowią one odbicie paleotektonicznego rozwoju zbiornika sedymentacji. Czynniki paleotektoniczny warunkował intensywność ruchów wynoszących obszary źródłowe oraz paleogeografię całego zbiornika. Był to czynnik wyższego rzędu działający w skali regionalnej.

Pozornie przypadkowe „szumy” maskujące prawidłowości w następstwie facji można interpretować jako skutek zmienności warunków sedymentacji w miejscu badanego profilu. Warunki sedymentacji były czynnikiem niższego rzędu działającym lokalnie, w miejscu depozycji. Miały one wpływ na pionowe i poziome rozmieszczenie materiału mułowcowego oraz kolejność wewnątrzławicowych struktur sedymenta-

cyjnych. Jednak sam fakt dopływu materiału mułowcowego do zbiornika oraz częstość i intensywność tego procesu zależały od czynnika nadrzędnego — paleotektoniki.

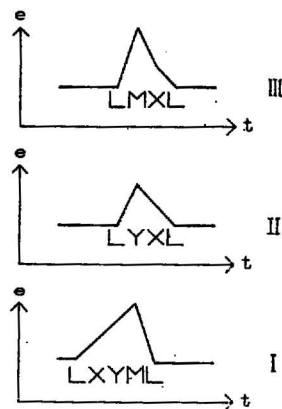
Główne tendencje zmian aktywności paleotektonicznej obszarów źródłowych rozpoznać można analizując charakter rytmów najczęstszych.

Rytm najczęstszy odcinków I i III jest taki sam (LM) i wskazuje na stosunkowo znaczną aktywność ruchów dźwigających obszary lądowe. Jak wynika z energetycznego szeregu facji, częste występowanie rytmu LM świadczy o znacznej energii prądów zawieszinowych przerywających powolną sedymentację ilastą. Jest także dowodem napływu pokaźnej ilości materiału terygenicznego do zbiornika. Odcinek II powstał w okresie mniejszej aktywności paleotektonicznej. Rytm najczęstszy ma tu postać LX. Facja X świadczy o niskiej energii prądów zawieszinowych i znikomej ilości dostarczonego do zbiornika materiału mułowcowego. Istotne znaczenie dla przedstawionej tu interpretacji ma zmienność miąższości ławic mułowców. Największe miąższości tych ławic spotyka się w odcinku I. Stąd wniosek, że choć zarówno odcinek I jak i III oznaczają wzmożenie paleotektonicznej aktywności lądowych ram zbiornika, to jednak impulsy tektoniczne współczesne osadom odcinka I były silniejsze. Na fig. 2 oznaczono schematycznie zmienność głównego trendu paleotektonicznej aktywności obszarów źródłowych w czasie tworzenia się kompleksu łupkowo-mułowcowego. Jak wynika ze wspomnianej figury, największe nasilenie ruchów wynoszących obszary lądowe przypada na przyspągową partię ludlowu dolnego oraz dolną część ludlowu górnego (tj. powyżej poziomu *Saetograptus leintwardinensis*).

Fig. 5. Hipotetyczne krzywe zmian energii impulsów tektonicznych w czasie powstawania poszczególnych odcinków kompleksu łupkowo-mułowcowego (zaznaczone cyframi rzymskimi)

Hypothetical curves of changes of tectonic impulses energy during generation of the individual sections of the shale-siltstone complex (marked by Roman numerals)

e — energia; t — czas; MLXY — symbole facji
e — energy; t — time; MLXY — facies symbols



Dokładniejsze poznanie paleotektonicznej aktywności sylurskich obszarów źródłowych można osiągnąć dzięki zastosowaniu opisanego poprzednio prostej metody matematycznej. Otrzymane dzięki niej idealne diagramy najczęstszych powiązań facjalnych ilustrują działanie czynnika tektonicznego w jego czystej postaci, pozbawionej zakłóceń związanych z lokalnymi warunkami sedymentacji. Zgodnie z tym ujęciem, rytmy idealne stanowią zapis mechanizmu impulsów tektonicznych wypiętrza-

jących obszary źródłowe, a ściślej: prędkości zmian energii tych impulsów.

Nawiązując ponownie do energetycznego szeregu facji, rytm idealny poszczególnych odcinków kompleksu łupkowo-mułowcowego można interpretować następująco (fig. 5).

Charakterystyczny dla odcinka I rytm idealny LXYM wskazuje na stopniowo narastające i — po osiągnięciu maksimum intensywności — szybko wygasające impulsy tektoniczne. Natomiast w czasie powstawania odcinka II, jak o tym świadczy rytm idealny LYX, impulsy tektoniczne pojawiały się gwałtownie¹, a następnie stopniowo słabły. Rytm idealny odcinka III — LMX świadczy, że ruchy dźwigające obszary źródłowe miały szczególnie gwałtowny charakter — gwałtownie „wybuchwały” i dość gwałtownie gasły. Charakterystyczna jest przy tym niemal zupełna zgodność rzeczywistego i idealnego diagramu najczęstszych powiązań facjalnych. Czynniki przypadkowy (lokalne warunki sedimentacji) był zbyt słaby, aby zakłócić prawidłowości rządzące następstwem facji. Przestrzegając zasad przyjętej tu interpretacji, należy stwierdzić, że w profilu odcinka III zaznacza się szczególnie silny wpływ czynnika paleotektonicznego. Pozostaje to zapewne w związku z krakowską fazą orogenezy kaledońskiej (por. K. Łydką, S. Siedlecki, H. Tomczyk, 1963).

Zakład Petrografii i Geochemii
Instytutu Geologicznego,
Warszawa, ul. Rakowiecka 4
Nadesłano dnia 4 czerwca 1974 r.

PIŚMIENNICTWO

- DADLEZ R. (1967) — Najnowsze profile podłoża cechsztynu w północno-zachodniej Polsce. *Kwart. geol.*, 11, p. 572—586, nr 3. Warszawa.
- DE RAAF J. F. M., READING H. G., WALKER R. G. (1965) — Cyclic sedimentation in the Lower Westphalian of North Devon. *Sedimentology*, 4, p. 1—52, nr 1/2. Amsterdam.
- DUFF P. McL. D., WALTON E. K. (1962) — Statistical basis for cyclothems: a quantitative study of the sedimentary succession in the East Pennine Coalfield. *Sedimentology*, 1, p. 235—255, nr 4. Amsterdam.
- GINGERICH P. D. (1969) — Markov analysis of cyclic alluvial sediments. *Journ. Sed. Petrology*, 39, p. 330—332, nr 1. Menasha.
- GRIFFITHS J. C. (1966) — Future trends in geomathematics. *Mineral Industries*, 35, p. 1—8, nr 5. Pennsylvania.
- HARBAUGH J. W., BONHAM-CARTER G. (1970) — *Computer simulation in geology*. Wiley-Interscience. New York — London — Sydney — Toronto.
- JAWOROWSKI K. (1971) — Sedimentary structures of the Upper Silurian siltstones in the Polish Lowland. *Acta geol. pol.*, 21, p. 519—571, nr 4. Warszawa.

¹ Impuls gwałtowny może być impulsem słabym i odwrotnie: impuls stopniowo narastający może być silny.

- KRUMBEIN W. C. (1967) — Fortran IV computer programs for Markov chain experiments in geology. Computer Contribution, nr 13. University of Kansas.
- ŁYDKA K., SIEDLECKI S., TOMCZYK H. (1963) — On the Middle Ludlovian conglomerates in the Cracow region. Bull. Acad. Pol. Sc. Sér. Sc. géol. géogr., 11, p. 93—99, nr 2. Varsovie.
- POŻARYSKI W. (1964) — Zarys tektoniki paleozoiku i mezozoiku Niżu Polskiego. Kwart. geol., 8, p. 1—41, nr 1. Warszawa.
- POŻARYSKI W. (1968) — Rozwój tektoniczny starszego paleozoiku w środkowej i północnej Polsce. Kwart. geol., 12, p. 1027—1029, nr 4. Warszawa.
- SELLEY R. C. (1970) — Studies of sequence in sediments using a simple mathematical device. Quart. Journ. Geol. Soc. Lond., 125, p. 557—581, nr 500. London.
- TELLER L., KOREJWO K. (1968) — Early Palaeozoic deposits in the deep substratum of north—western Poland. Acta geol. pol., 18, p. 613—619, nr 3. Warszawa.
- TOMCZYK H. (1962) — Uwagi o sedimentacji warstw wydryszowskich w regionie łysogórskim i warstw siedleckich w otworze Łębork. Prz. geol., 10, p. 407—410, nr 8. Warszawa.
- TOMCZYK H. (1968) — Stratygrafia syluru w obszarze nadbałtyckim Polski na podstawie wierceń. Kwart. geol., 12, p. 15—36, nr 1. Warszawa.
- TOMCZYK H. (1970) — Silurian. In: Geology of Poland, I, Stratigraphy, 1, p. 237—319. Warszawa.
- TOMCZYK H. (1973) — Sylur. W: Dokumentacja wynikowa otworu badawczego Kościerzyna IG-1. Arch. Inst. Geol. (maszynopis). Warszawa.
- WALTON E. K. (1967) — The sequence of internal structures in turbidites. Scott. Journ. Geol., 3, p. 306—317, nr 2. Edinburgh.
- WELLER J. M. (1960) — Stratigraphic principles and practice. Harper, New York.
- ZNOSKO J. (1962) — Obecny stan znajomości budowy geologicznej głębokiego podłoża pozakarpackiej Polski. Kwart. geol., 6, p. 485—511, nr 3. Warszawa.
- ZNOSKO J. (1964) — Poglądy na przebieg kaledonidów w Europie. Kwart. geol., 8, p. 697—720, nr 4. Warszawa.
- ZNOSKO J. (1965) — Problem kaledonidów i granicy platformy prekambryjskiej w Polsce. Biul. Inst. Geol., 188, p. 5—40. Warszawa.
- ВИСТЕЛИУС А. Б. (1949) — К вопросу о механизме слоесобразования. Докл. АН СССР, 65, стр. 191—194, № 2. Москва.

Кшиштоф ЯВОРОВСКИ

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ОЧЕРЕДНОСТИ СИЛУРСКИХ
ОТЛОЖЕНИЙ В РАЗРЕЗЕ КОСЬЦЕЖИНЫ (СЕВЕР ПОЛЬШИ)**

Резюме

Мощность силурских отложений в скважине Косьцежина ИГ-1 составляет 2300 м, из которых 1555 м занимает сланцево-алевролитовый комплекс. Этот комплекс имеет место в нижнем лудлове и в нижней части верхнего лудлова. В пределах сланцево-алевролитового комплекса выделено четыре фации: алевролитовая, сланцевая, сланцево-алевролитовая

и алевролитово-сланцевая. Принято, что процесс, приводящий к созданию разреза исследованных отложений, является „процессом Маркова” первого порядка. Детерминистический элемент, наблюдающийся в последовательности фаций, интерпретируется как отражение тектонической активности площадей алиментации алевролитового материала. Случайный элемент является в данном случае отражением локальных условий седиментации.

Простыми подсчетами устранен в разрезе „шум” случайных помех маскирующих „идеальную” последовательность фаций. Подсчеты выполнены по формуле:

$$m_{ij} = n_{ij} - \frac{n_i \cdot n_j}{N - n_i}$$

где: m_{ij} — разница между установленным количеством переходов (вверх) фации i в фацию j , а также количеством переходов (вверх) фаций i в фацию j , которые следует ожидать при случайной очередности фаций; n_{ij} — количество переходов (вверх) фации i в фацию j , установленное в разрезе; n_i — количество всех случаев залегания фации i в разрезе; n_j — количество всех случаев залегания фации j в разрезе; N — количество всех изученных переходов между различными фациями.

На основе подсчитанных величин m_{ij} , установлены идеальные ритмы последовательности фаций. Из анализа идеальных ритмов и мощности алевролитовых пластов следует, что энергия тектонических импульсов была самой сильной в нижней части нижнего лудлова и, что самые быстрые изменения энергии этих импульсов имели место в верхнем лудлове, т. е. выше горизонта *Saetograptus leintwardinensis*.

Krzysztof JAWOROWSKI

**MATHEMATICAL INTERPRETATION OF THE SEQUENCE IN THE SILURIAN
SEDIMENTS OF KOŚCIERZYNA
(NORTHERN POLAND)**

Summary

The thickness of the Silurian sediments encountered in the Kościerzyna IG-1 borehole is 2 300 m, of which the shale-siltstone complex makes up 1 555 m. This complex occurs in the Lower Ludlovian and in the lower portion of the Upper Ludlovian. The siltstone beds were deposited by turbidity currents. Four facies have been distinguished in the shale-siltstone complex: siltstone, shale, shale-siltstone, and siltstone-shale. It has been assumed that the generating process of the sequence studied was a first-order Markov process. The deterministic component included in the facies sequence has been interpreted as a reflection of tectonic activity of alimentation areas of the siltstone material. With this approach the random component reflects local depositional conditions.

The random "noise" obscuring the "ideal" facies sequence has been eliminated by simple calculations. The calculations have been based on the following formula:

$$m_{ij} = n_{ij} - \frac{n_i \cdot n_j}{N - n_i}$$

where: m_{ij} — the difference between the found number of upward transitions from facies i to facies j and the number of upward transitions from facies i to facies j predicted if their vertical arrangement was random; n_{ij} — the number of upward transitions from facies i to facies j found in the sequence; n_i — the total number of occurrences of facies i in the sequence; n_j — the total number of occurrences of facies j in the sequence; N — the total number of all the examined transitions between different facies.

The calculated m_{ij} values served to establish the ideal rythms of the facies sequence. The analysis of ideal rythms and siltstone beds thicknesses revealed, that the energy of tectonic impulses was the highest in the lower part of the Lower Ludlovian and that the most rapid changes of the impulse energy occurred in the Upper Ludlovian i.e. above the *Saetograptus leintwardimensis* zone.