

Zastosowania skamieniałości śladowych w analizie facjalnej i wysokorozdzielczej stratygrafii sekwencji — przykład z kambru polskiej części kratonu wschodnioeuropejskiego

Jolanta Paczeńska*

An application of trace fossils in the facies analysis and high-resolution sequence stratigraphy — an example from the Cambrian of the Polish part of the East European Craton. *Prz. Geol.*, 49: 1137–1146.

S u m m a r y. Trace fossils are a good tool for identification and interpretation of sedimentary environments. The basic procedure of ichnofacies analysis is to define the interactions between the ecological structure of trace fossil assemblage and the abiotic factors of environment. The ichnologic criteria are very good and easily recognizable indicators of the environmental architecture of parasequences and their bounding surfaces. Furthermore, the trace fossil assemblages can be used as indicators of paleobathymetric trends in geological sequences, thus indicating contrasting stacking patterns of packages of parasequences. The Middle Cambrian parasequence package of the Podlasie Depression (central part of the Polish segment of the East European Craton) shows a distinctly upward shallowing trend interfingering between upper offshore, lower and upper shoreface environmental zones. These parasequences are arranged into a regressive, progradational parasequence set of highstand system tract. Another trend appears in the retrogradational parasequence set of transgressive system tract in the Lower Cambrian deepening upward succession of the Podlasie Depression. In the upper parts of the sequence, parasequences with more deep-water assemblages of trace fossils, indicating the upper offshore environments, prevail. Based on the ichnologic criteria, stratigraphically significant discontinuities can be delineated. The more readable in an ichnologic record are the flooding surface bounding parasequences, parasequence sets and transgressive or regressive surfaces of coastal erosion. Discontinuity surfaces are marked by substrate-controlled *Glossifungites* assemblage of trace fossil excavated in semiconsolidated, firmground substrates previously highly bioturbated by a softground ichnofossil assemblage.

Key words: trace fossils, ichnofacies analysis, sedimentary environments, high-resolution sequence stratigraphy, ichnologic record of discontinuity surfaces, Cambrian, Podlasie Depression, East-European Craton

Skamieniałości śladowe są kopalnym zapisem czynności życiowych organizmów. Wrażliwość behawioru twórców śladów na oddziaływanie środowiska powoduje, że zmiany abiotycznych czynników środowiskowych, przede wszystkim batymetrii zbiornika, energii środowiska, zasolenia, natlenienia wód, natlenienia przypowierzchniowych warstw osadów, ich kohezji i stabilności oraz tempa sedymentacji uwidaczniają się w składzie asocjacji skamieniałości śladowych. Fakt ten powoduje, że zastosowanie metody ichnologicznej w analizie paleośrodowiskowej pozwala uzyskać wysoką rozdzielczość typowania środowisk sedymentacji i dokładną rejestrację zmian środowiskowych w skałi basenu sedymentacyjnego. Jest ona w chwili obecnej, obok metody sedymentologicznej, podstawowym narzędziem wyróżniania i opisu facji.

Wspomniane wcześniej cechy analizy ichnofacjalnej warunkują jej przydatność w określaniu czasowo-przestrzennych ram wypełnienia osadowego basenów sedymentacyjnych. Wysoka rozdzielczość wyznaczania zmian środowiskowych w zbiornikach morskich, szczególnie tych, które są związane z gwałtownymi wahaniami względnego poziomu morza, umożliwia zastosowanie asocjacji skamieniałości śladowych w stratygrafii sekwencji. Są one szczególnie użytecznym narzędziem w opisie architektury środowiskowej i wyznaczaniu granic jednostek wysokorozdzielczej stratygrafii sekwencyjnej, tj. parasekwencji.

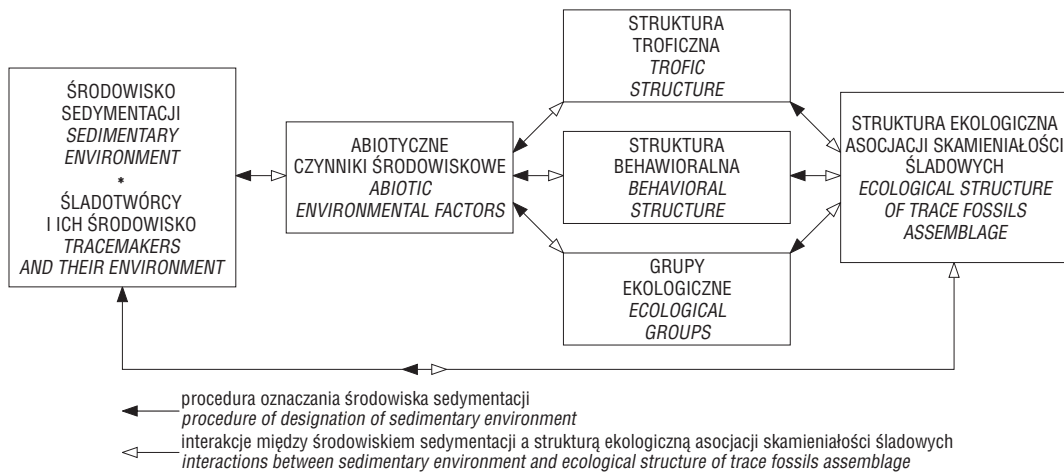
Skamieniałości śladowe są precyzyjnym wskaźnikiem powierzchni nieciągłości w profilach geologicznych, w

tym związanych z oddziaływaniem erozji przybrzeżnej w różnych etapach rozwoju basenu sedymentacyjnego.

Analiza ichnofacjalna jako narzędzie wyróżniania i opisu środowisk sedymentacji

W analizie ichnofacjalnej bierze się pod uwagę zespół cech paleontologiczno-sedymentologicznych danej facji. Jej aspektem paleontologicznym jest biologiczna, behawioralna geneza skamieniałości śladowych. Do podstawowych elementów tego segmentu analizy ichnofacjalnej należą: badanie sposobu rozmieszczenia skamieniałości śladowych (rozproszone lub tworzące skupienia w określonych częściach profilu) oraz szczegółowe analizowanie składu i zróżnicowania ichnotaksonomicznego. Z punktu widzenia środowiskowych i stratygraficznych zastosowań analizy ichnofacjalnej, zasadniczą rolę odgrywają detaliczne, jakościowe i ilościowe badania rozmieszczenia grup etologicznych skamieniałości śladowych w profilach. Wymienione działania prowadzą do wyróżnienia asocjacji skamieniałości śladowych i ustalenia ich sukcesji. W każdej asocjacji określa się strukturę ekologiczną (Paczeńska, 1996), na którą składają się (zob. ryc.1): struktura behawioralna asocjacji tworzona przez podstawowe grupy etologiczne skamieniałości śladowych (np. domichnia, fodinichnia, repichnia, cubichnia, fugichnia), struktura troficzna, wskazująca na sposoby odżywiania się organizmów bentonicznych, najczęściej reprezentowanych przez filtratorów z zawiesiny i osadożerców. Inne sposoby odżywiania się organizmów, takie jak drapieżnictwo i zbieranie substancji organicznej na powierzchni osadu według ściśle, genetycznie określonego programu, zachowują się znacznie rzadziej w zapisie ichnologicznym. Elementem struktury ekologicznej asocjacji skamieniałości śladowych są również grupy ekologiczne twórców śladów aktywności

*Państwowy Instytut Geologiczny, Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; e-mail: jpacz@pgi.waw.pl



Ryc. 1. Relacje między środowiskiem sedymentacji i strukturą ekologiczną zespołu skamieniałości śladowych oraz ich implikacje w procedurze oznaczania środowiska sedymentacji
Fig. 1. Interactions between the depositional environment and the ecological structure of trace fossil assemblage and their implications in the procedure of determination of sedimentary environment

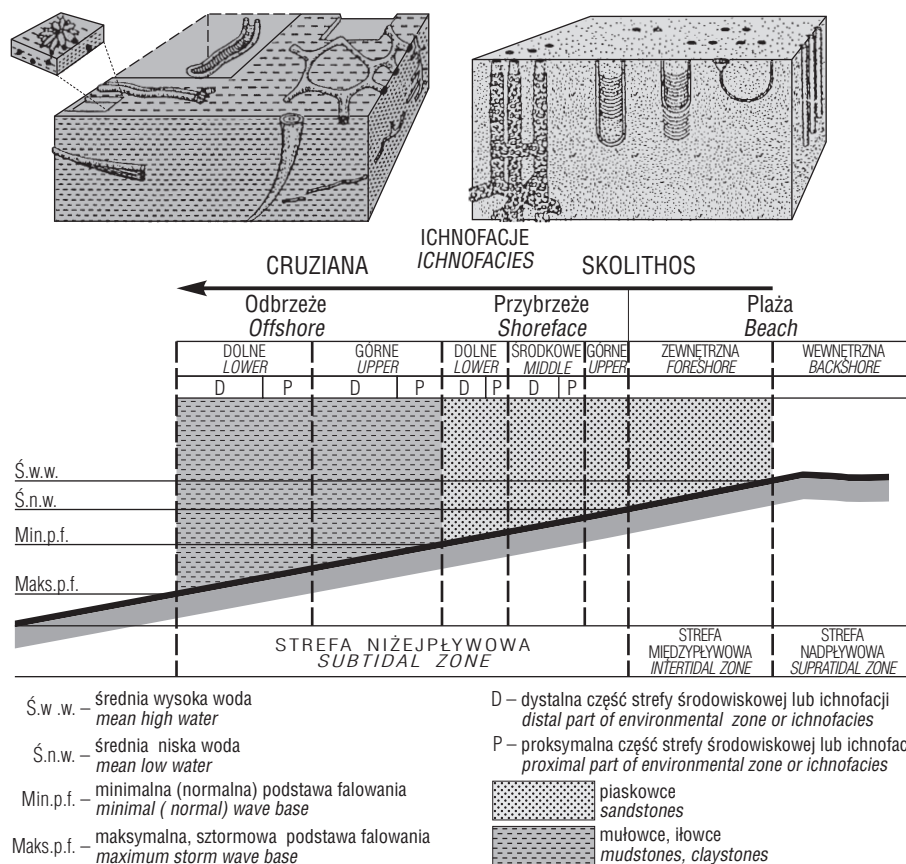
życiowej (epifauna ruchoma i osiadła, infauna ruchoma i semi-infauna).

Istotnym czynnikiem analizy ichnofacjalnej jest określenie stopnia zbioturbizowania osadu poprzez jego porównanie ze skalą graficzną i liczbową (Droser & Bottjer, 1986) wskaźników natężenia bioturbacji. Zarówno struktura behawioralna, troficzna, jak i grupy ekologiczne asocjacji skamieniałości śladowych wskazują na rodzaj determinujących je, abiotycznych czynników środowi-

energetyczne, natomiast zamieszkują organizmy osadożerne, tolerujące mniejszą zawartość tlenu w osadzie. Pozostawiają one w osadzie struktury żerowiskowo-mieszkalne typu fodinichnia. Podobną zależność od czynników abiotycznych wykazuje struktura troficzna asocjacji skamieniałości śladowych. Sposoby odżywiania się organizmów są determinowane zarówno przez energię środowiska, jak również przez rodzaj osadów i ich potencjał do gromadzenia i przechowywania pokarmowej substancji organicznej.

Zależność ta szczególnie wyraźnie występuje w przypadku występowania populacji osadożerców, uwarunkowanej zasobami pokarmu w osadzie.

Badanie stopnia powiązania struktury ekologicznej asocjacji skamieniałości śladowych z rodzajem osadu stanowi aspekt sedimentologiczny analizy ichnofacjalnej. Bierze się tutaj pod uwagę związki struktury ekologicznej z litologicznymi aspektami facji. Skamieniałości śladowe powstają w trakcie sedymentacji osadu lub po jego przynajmniej częściowej konsolidacji i jako takie, są jego integralną częścią. Ścisłe relacje osad-śladotwórca-asocjacja skamieniałości śladowych stwarzają podstawy do wyciągania wniosków o natężeniu fizycznych czynników środowiskowych, związanych z osadem. Są to przede wszystkim wielkość uziarnienia i spistość osadu. Powiązania te determinują strukturę ekologiczną zespołu śladotwórców i pozostawionej przez niego asocjacji śladów w zakresie relacji śladotwórca-osad. Nośnikiem uzupełniających



Ryc. 2. Model rozmieszczenia podstref środowiskowych przybrzeża i odrzeża, z towarzyszącymi ichnofacjami Skolithos i Cruziana (według MacEachern & Pemberton, 1992)
Fig. 2. The model of the distribution of environmental subzones in shoreface and offshore with associated Skolithos and Cruziana ichnofacies (after MacEachern & Pemberton, 1992)

informacji są w tym segmencie analizy ichnofacjalnej studia zróżnicowania i rozmieszczenia towarzyszących skamieniałościom śladowym struktur sedymentacyjnych. Istotnych informacji o natężeniu abiotycznych czynników środowiskowych dostarcza analiza rozmieszczenia w osadzie indykatywnych środowiskowo składników litologicznych.

Modele ichnofacjalne

Organizmy zasiedlają strefy zbiorników morskich zróżnicowane pod względem abiotycznych czynników środowiskowych. Rodzaj środowiska panującego w siedlisku decyduje o wymaganiach ekologicznych i przede wszystkim, zdolnościach adaptacyjnych zamieszkującej go populacji. Ta podstawowa zależność powoduje, że pozostawione przez organizmy ślady ich aktywności życiowej stanowią zapis wzajemnych relacji między śladotwórcami i środowiskiem ich życia.

Ichnologiczna analiza facjalna prowadzi poprzez wydzielenie asocjacji skamieniałości śladowych, następnie ustalenie oddziaływania abiotycznych czynników środowiskowych na kształt ich struktury ekologicznej, do oznaczenia i opisu środowiska sedymentacji (por. ryc. 1).

W efekcie tych działań powstaje model ichnofacjalny, którego głównym celem jest rekonstrukcja środowisk życia twórców śladów zarówno w aspekcie biologicznym, jak i fizycznym. Model ichnofacjalny przedstawia opis środowisk oraz ich sukcesję w profilu.

Bardzo ważnym czynnikiem, często decydującym o właściwym rozpoznaniu rodzaju środowiska sedymentacji i stopnia rozdzielczości wydzieleni środowiskowych, jest zastosowanie odpowiedniego, ramowego modelu rozmieszczenia środowisk sedymentacji, charakterystycznego dla określonego systemu depozycyjnego. Jednym z częściej stosowanych modeli we współczesnych badaniach ichnofacjalnych, jest północnoamerykański model (McEachern & Pemberton, 1992) rozmieszczenia środowisk na płytkim szelfie klastycznym (ryc. 2). Łączy on w sobie zarówno aspekty biologiczne analizy ichnofacjalnej, biorąc pod uwagę środowiska życia śladotwórców, jak i jej aspekty sedymentologiczne, przedstawiając opisy litologii osadów oraz występujących w nich struktur sedymentacyjnych w strefach zewnętrznej (*foreshore*) i wewnętrznej (*backshore*) plaży, dolnego, środkowego i górnego przybrzeża (*lower, middle, upper shoreface*) oraz górnego i dolnego odbrzeża (*upper, lower offshore*). W podstrefach przybrzeża i odbrzeża wyróżnia się część dystalną i proksymalną. Każde z wydzieleni środowiskowych cechuje się swoistymi asocjacjami skamieniałości śladowych i zestawem struktur sedymentacyjnych. Cechą umożliwiającą przeprowadzenie detalicznej analizy paleośrodowiskowej profilów jest wysoka rozdzielczość tego modelu w typowaniu stref i podstref środowiskowych oraz możliwość jego dowiązania do innych modeli środowiskowych. Najczęściej model ten jest porównywany z klasycznym modelem środowisk sedymentacji na wybrzeżach pływowych (Reineck & Singh, 1980), który jest modelem wyłącznie sedymentologicznym, nie uwzględniającym biologicznych

aspektów facji. Model ten nie prezentuje rozmieszczenia zespołów organizmów na równi pływowej. Został on skonstruowany wyłącznie na podstawie zmienności litologii osadów i rozmieszczenia struktur sedymentacyjnych. Inną, istotną jego wadą jest niska, w porównaniu do modelu północnoamerykańskiego, rozdzielczość typowania stref środowiskowych, utrudniająca jego zastosowanie w wysoko-rozdzielczej stratygrafii sekwencyjnej.

Ilustratywnym przykładem zastosowania i porównania obu wspomnianych modeli w interpretowaniu środowisk sedymentacji jest spągowa część profilu dolnego kambru, zlokalizowanego w zachodniej części obniżenia podlaskiego (ryc. 4) otworu wiertniczego Okuniew IG 1. Połączenie obu modeli pozwoliło na detaliczne odtworzenie sukcesji zespołów organizmów bentonicznych i asocjacji śladów ich aktywności życiowej oraz rekonstrukcję historii sedymentacji osadów (ryc. 5). Efektem tych działań było wydzielenie stref i podstref środowiskowych na obszarze równi pływowej według modelu północnoamerykańskiego. Opis i interpretację środowisk sedymentacji wyróżnionych w profilu Okuniew IG1 przedstawiono w tab. 1.

Ichnofacje w analizie facjalnej — zmierzch podstawowego kanonu ichnologii?

Szybki rozwój analizy ichnofacjalnej w ostatniej dekadzie, uczynił z niej wielowątkowy kierunek badawczy, odsuwając na dalszy plan tak kiedyś modne w ichnologii badania archetypowych ichnofacji *sensu* Seilacher (1967) oraz Frey & Seilacher (1980).

Do rozwoju analizy ichnofacjalnej przyczyniły się przede wszystkim detaliczne badania współczesnych, przybrzeżnych środowisk szelfowych wykazując, że są one daleko bardziej zróżnicowane pod względem ekologicznym, niż dotychczas sądzono. Klasycznym obszarem, na którym od wielu lat są prowadzone neoichnologiczne badania środowiskowe jest wschodnie wybrzeże USA (np. Pemberton & Frey, 1985; Frey & Pemberton, 1987; Pemberton i in., 1992a). Podobne badania były również prowadzone u wybrzeży Korei (Frey i in., 1989). Badania porównawcze kopalnych sukcesji środowisk i występujących w nich asocjacji skamieniałości śladowych z modelami rozmieszczenia środowisk na współczesnych szelfach, były szczególnie intensywnie prowadzone przez ichnologów północnoamerykańskich. Wyniki tych badań zostały przedstawione w wielu fundamentalnych, obszernych opracowaniach (np. Curran, 1985; Pemberton, 1992). Podstawowym efektem tych studiów jest praktyczne wykazanie nieprzydatności klasycznych, będących kanonem ichnologii wydzieleni ichnofacjalnych do celów współczesnej analizy facjalnej. Składa się na to przede wszystkim bardzo ogólny charakter tych wydzieleni, nie uwzględniający stwierdzonej współcześnie ekologicznej złożoności marginalnych środowisk morskich. Każda z ichnofacji obejmuje kilka stref i podstref środowiskowych, często bardzo różniących się między sobą zarówno abiotycznymi i biotycznymi czynnikami środowiskowymi, jak i asocjacjami występujących w nich skamieniałości śladowych. Fakt ten jest zilustrowany na ryc. 2, na przykładzie

Tab. 1. Interpretacja środowisk sedymentacji w utworach kambru profilu Okuniew IG1 na podstawie biotycznych i abiotycznych wskaźników środowiskowych

Table 1. Interpretation of sedimentary environments in the Cambrian deposits of Okuniew IG1 well section on the basis of biotic and abiotic environmental indices

| Biotyczne wskaźniki środowiskowe | | | Fizyczne czynniki środowiskowe determinujące strukturę ekologiczną | Abiotyczne wskaźniki środowiskowe | | Środowiska sedymentacji |
|--|-------------------------|---|---|---|--|------------------------------------|
| Skamieniałości śladowe | Wskaźniki bioturbizacji | Struktura ekologiczna asocjacji skamieniałości śladowych | | Struktury sedymentacyjne | Litologia i składniki litologiczne | |
| Struktury ucieczkowe | 2 | dominacja fugichnia, filtratory, infauna osiadła | bardzo wysoka energia środowiska, wysokie tempo sedymentacji, bardzo niska kohezja osadu, dobre natlenienie | niskokątowe warstwowanie przekątne dużej skali | piaskowce grubo- i średnioziarniste, bardzo liczny glaukonit | plaża zewnętrzna (PZ) |
| Skolithos, Monocraterion, Bergaueria, Planolites | 2-4 | dominacja domichnia, filtratory, infauna osiadła | wysoka energia środowiska, wysokie tempo sedymentacji, niska kohezja osadów, dobre natlenienie | warstwowanie przekątne dużej skali, laminacja równoległa | piaskowce grubo- i drobnoziarniste, wkładki mułowców, liczny glaukonit | dystalne górne przybrzeże (DGP) |
| Skolithos, Bergaueria, Monocraterion, Planolites | 4-5 | domichnia przeważają nadfodinichnia, filtratory, osadozercy, infauna osiadła i ruchoma | dość wysoka energia środowiska, umiarkowane tempo sedymentacji, dobre natlenienie, bogate zasoby pokarmowe w osadzie | warstwowanie przekątne małej skali, laminacja równoległa | piaskowce drobnoziarniste mułowce, intraklasty mułowca w piaskowcu, liczny glaukonit | proksymalne dolne przybrzeże (PDP) |
| Teichichnus, Planolites, Bergaueria, Skolithos, Nereites | 2-6 | fodinichnia przeważają nad domichnia, osadozercy, filtratory, infauna ruchoma i osiadła | umiarkowana energia środowiska, niskie tempo sedymentacji, dobre natlenienie, wysoka kohezja osadów, bogate zasoby pokarmowe w wodzie i osadzie | warstwowanie przekątne małej skali, laminacja równoległa, warstwowanie smużyste | piaskowce drobnoziarniste, mułowce, ilowce, nieliczny glaukonit | proksymalne górne odbrzeże (PGO) |
| Teichichnus, Planolites | 4-6 | dominacja fodinichnia, osadozercy, infauna ruchoma | niska energia środowiska, niskie tempo sedymentacji, lokalne niedotlenienie zbiornika, bogate zasoby pokarmowe w osadzie | warstwowanie przekątne małej skali, laminacja równoległa | mułowce, ilowce z wkładkami piaskowców drobnoziarnistych | dystalne górne odbrzeże (DGO) |

ichnofacji Skolithos i Cruziana, obejmujących zasięgiem kilka, bardzo wyraźnie różniących się ekologicznie i ichnologicznie stref i podstref środowiskowych.

Niska rozdzielczość środowiskowa ichnofacji wyklucza ich zastosowanie w wysokorozdzielczej stratygrafii sekwencyjnej.

Stratygraficzne zastosowania skamieniałości śladowych

Wraz z rozwojem multidyscyplinarnego kierunku badań jakim jest analiza basenów sedymentacyjnych,

zaistniała potrzeba stosowania coraz bardziej precyzyjnych narzędzi w odtwarzaniu facjalnego obrazu ich wypełnienia. Metoda ichnofacjalna, wnosząc wysoką dokładność wyznaczania zmian facjalnych w profilach, w połączeniu z badaniami sedymentologicznymi oraz biostratygraficznymi stworzyła gruntowne podstawy do odtwarzania czasowo-przestrzennych ram wypełnienia osadowego basenów sedymentacyjnych. Wykazywana przez nią rozdzielczość wyróżniania środowisk sedymentacji spowodowała, że jest ona w chwili obecnej często stosowanym, sprawdzającym się w praktyce narzędziem wysokorozdzielczej stratygrafii sekwencyjnej (np. Pem-

berton & MacEachern, 1995; Anderson & Droser, 1998). Interpretacja środowiskowa asocjacji skamieniałości śladowych umożliwia opis architektury środowiskowej parasekwencji, będących najmniejszymi jednostkami stratygrafii sekwencyjnej. Skamieniałości śladowe stały się narzędziem określania trendów paleobatymetrycznych w sekwencjach depozycyjnych i wynikającym z nich wyróżnianiu ciągów systemowych parasekwencji (np. Savrda, 1991; Snedden, 1991; Pemberton i in., 1992b; Castle, 1998; Alvaro & Vennin, 1998; Siggerud & Steel, 1999).

Kryteria ichnologiczne są również stosowane przy wyróżnianiu powierzchni nieciągłości różnego typu, odgrywających kluczową rolę w wyznaczaniu jednostek stratygrafii sekwencyjnej (np. MacEachern i in., 1992; Krawinkel & Seyfried, 1996).

Asocjacje skamieniałości śladowych a wydzielenie jednostek wysokorozdzielczej stratygrafii sekwencyjnej

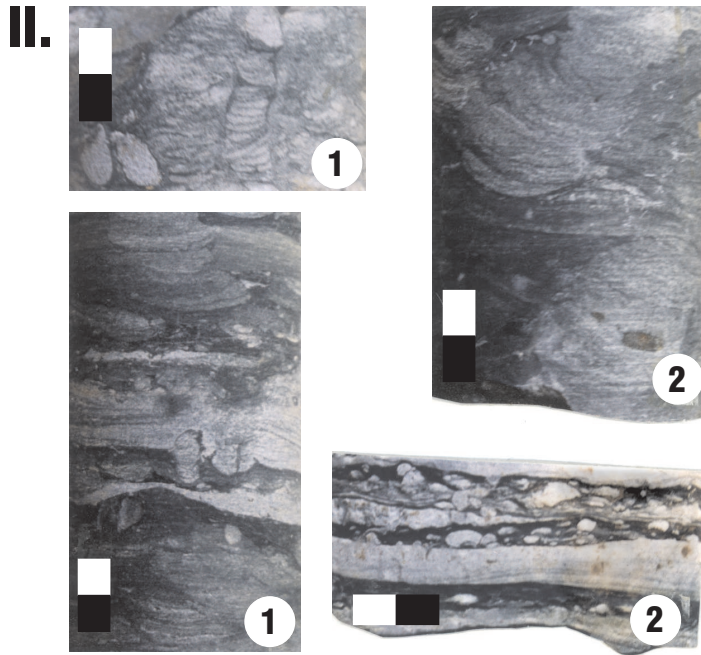
Parasekwencje są pakietami genetycznie powiązanych warstw lub ich zestawów, ograniczonych przez powierzchnie morskiego zalewu i ich powierzchnie korelacyjne (np. Van Wagoner i in., 1992; Pope & Read, 1997). W profilach zaznaczają one swoją obecność jako rytmicznie powtarzające się pakiety środowisk sedymentacji. Każda z parasekwencji wykazuje progresję spływających się ku górze środowisk. Granice parasekwencji definiują wymiany asocjacji skamieniałości śladowych (ryc. 3I), charakteryzujących różne natężenie pogłębiania się zbiornika, wywołane wahaniami względnego poziomu morza o zasięgu regionalnym. Są one zaznaczone przez mniejszą koncentrację głębokowodnych skamieniałości śladowych na granicach parasekwencji i liczniejsze ich występowanie na granicach zestawów parasekwencji. W praktyce oznacza to, że granice parasekwencji wyznacza się w momencie pojawienia się w profilu nad płytkowodną asocjacją skamieniałości śladowych innej asocjacji, w której bardzo wyraźnie dominują formy głębszego morza. Towarzyszą im w minimalnych ilościach przedstawiciele form związanych z płytszymi strefami zbiornika. Zastąpienie płytkowodnej asocjacji skamieniałości śladowych (por. ryc. 3A) przez asocjację głębokowodną (por. ryc. 3B) wskazuje na pogłębienie się zbiornika w skali regionalnej, związane z wahaniami względnego poziomu morza i wyznacza powierzchnie zalewu morskiego, będące jednocześnie granicami parasekwencji. Są one zapisem izochronicznego zdarzenia w zbiorniku i tym samym, są liniami równego czasu w skali regionalnej.

W przypadku granic zestawu parasekwencji wspomniana wcześniej koegzystencja mieszanych form nie występuje. Znaczący i gwałtowny wzrost względnego poziomu morza powoduje, że granice zestawów parasekwencji charakteryzuje wyłączone pojawienie się w profilu asocjacji skamieniałości śladowych typowych dla głębszych stref zbiornika morskiego. Przykładem tych zależności (por. ryc. 5) jest przejście od płytkich środowisk proksymalnego górnego odbrzeża (zestaw parasekwencji I) do głębszych środowisk dystalnego górnego odbrzeża (zestaw parasekwencji II), co jest indeksowane zastąpieniem jamek

mieszkalnych filtratorów przez jamki mieszkalno-żerowskie osadożerców. Granice zestawu parasekwencji są tworzone przez powierzchnie morskiego zalewu, wskazujące na bardziej gwałtowny wzrost głębokości zbiornika. Są to najczęściej momenty znaczącej przebudowy planu środowisk sedymentacji w skali basenu, stanowiące początek utrwalenia się dominacji głębszych środowisk.

Ichnologiczne wskaźniki trendów paleobatymetrycznych w sekwencjach depozycyjnych kambru basenu podlaskiego

Analiza facjalna dopuszcza interpretację zestawów parasekwencji jako zespołów systemów depozycyjnych, definiowanych i korelowanych na podstawie nieciągłości granicznych. W transgresywnych ciągach systemowych (*transgressive system tract* — *TST*; Porębski, 1996) występuje retrogradacyjny zestaw parasekwencji z przekraczającym w kierunku lądu ułożeniem zapisu linii brzegowej. Trendy paleobatymetryczne rysujące się w profilu mogą być odczytane z sukcesji asocjacji skamieniałości śladowych. W praktyce ichnologicznej oznacza to, że ku górze w profilach pojawiają się parasekwencje o wyraźnie zwiększonym udziale skamieniałości śladowych, wskazujących na głębsze środowiska. Fakt ten został zarejestrowany w należących do pierwszego, dolnopaleozoicznego cyklu transgresywno-regresywnego (Jaworowski, 1997) dolnokambryjskich sekwencjach zachodniej części obniżenia podlaskiego i zilustrowany na przykładzie profilu Okuniew IG1 (ryc. 5). Transgresywny ciąg systemowy składa się z pięciu parasekwencji, oznaczonych cyfrą 1^t — 5^t (ryc. 5). Dwie najniższe parasekwencje w ciągu cechuje skondensowana budowa środowiskowa, na którą składa się jeden typ środowiska — plaża zewnętrzna z rzadkimi skamieniałościami śladowymi, reprezentowanymi przez fugichnia — ślady ucieczkowe organizmów i dystalne górne przybrzeże z dość liczną, mieszaną etologicznie asocjacją skamieniałości śladowych, reprezentowaną przez domichnia filtratorów i mniej licznych przedstawicieli fodinichnia osadożerców. W górnych parasekwencjach wzrasta udział osadów mułowcowo-ilastych, maleje natomiast udział piaskowców. W parasekwencjach dominuje środowisko dystalnego górnego odbrzeża i wzrasta frekwencja jamek żerowskowo-mieszkalnych osadożerców (*Teichichnus*, *Planolites*). W interwałach profilu obejmujących to środowisko, nie występują jamki mieszkalne filtratorów, preferujących płytkie środowiska. Parasekwencja 4^t ma najbardziej urozmaiconą architekturę środowiskową w podlaskim ciągu transgresywnym. Występują tutaj naprzemianległe środowiska górnego odbrzeża oraz dolnego i górnego przybrzeża. Górną granicę parasekwencji 4^t wyznacza w profilu wyraźna wymiana asocjacji płytkowodnych skamieniałości śladowych na asocjację głębokowodną. Fakt ten oznacza utrwalenie się długotrwałej dominacji najgłębszego w profilu środowiska dystalnego górnego przybrzeża w nadległej parasekwencji 5^t. Epizodyczne pogłębienie się zbiornika wskazywane przez wystąpienie środowiska dystalnego górnego odbrzeża w stropowej części parasekwencji (ryc. 5) nie jest



Jamki żerowiskowo-mieszkalne osadożerców
Feeding-dwelling burrows of deposit-feeders

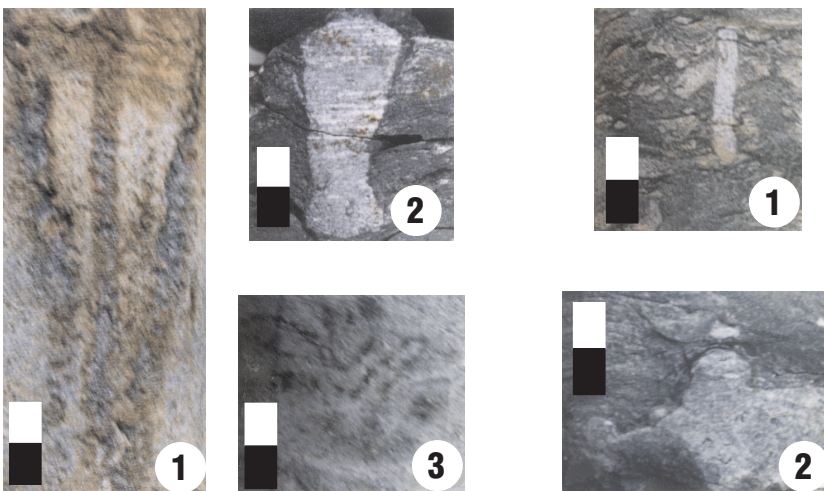
B. Dystalne górne odrzeże
Distal upper offshore

I. GRANICA PARASEKWENCJI
PARASEQUENCE BOUNDARY

A. Proksymalne dolne przybrzeże
Proximal lower shoreface

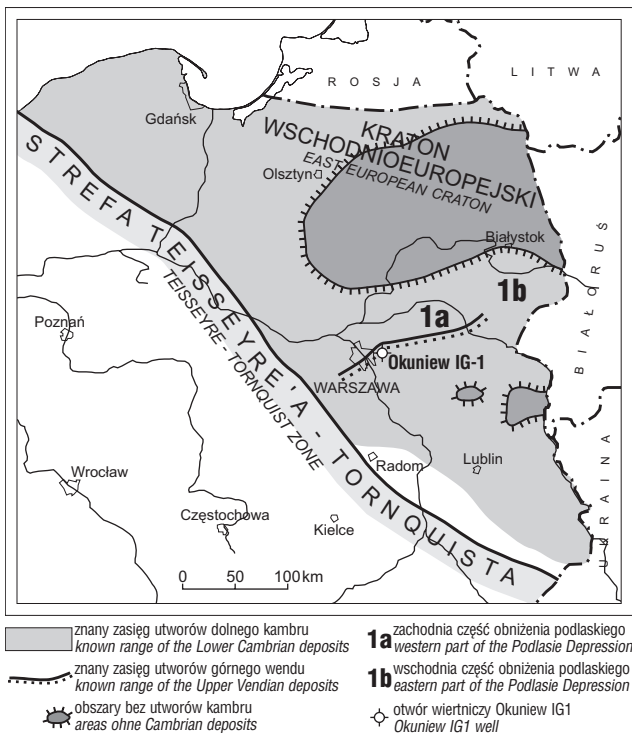
Jamki mieszkalne filtratorów
Dwelling burrows of filter-feeders

III. Powierzchnie erozyjne
Surfaces of erosion



Ryc. 3. Ichnologiczne kryteria wyznaczania powierzchni nieciągłości w sekwencji depozycyjnej dolnokambryjskiego, transgresywnego ciągu systemowego obniżenia podlaskiego; I. Granica parasekwencji określona na podstawie wymiany asocjacji skamieniałości śladowych. (A) strop dolnej parasekwencji z zespołem jamek mieszkalnych filtratorów w piaskowcowych osadach proksymalnego dolnego przybrzeża: 1 — *Monocraterion* isp., 2 — *Bergaueria major* Palij., 3 — Struktura ucieczkowa organizmu (B) spąg górnej parasekwencji z jamkami żerowiskowo-mieszkalnymi osadożerców w mułowcowych osadach dystalnego górnego odrzeża: 1 — *Teichichnus rectus* Seilacher, 2 — Żerowiskowe bioturbacje w mułowcu, przewarstwiewiającym się z piaskowcem bez struktur sedimentacyjnych II. Jamki oportunistycznych osadożerców, występujące bezpośrednio nad granicą zestawów (I i II) parasekwencji w transgresywnym ciągu systemowym: 1 — *Teichichnus* ichnosp., 2 — *Teichichnus rectus* Seilacher, III. Transgresywne powierzchnie erozyjne: 1. *Skolithos* ichnosp., jamka filtratora zbudowana w częściowo skonsolidowanym, zbioturbowanym osadzie, przykład ichnofacji *Glossifungites*, występującej na granicy zestawów parasekwencji, 2 — Powierzchnia erozyjna w piaskowcu proksymalnego górnego odrzeża związana z gwałtownym wzrostem względnego poziomu morza

Fig. 3. An ichnologically marked discontinuity surface within the depositional sequence of the Lower Cambrian transgressive system tract of the Podlasie Depression; I. A parasequence boundary delineated on the basis of turnover of trace fossil assemblages. (A) top of the lower parasequence with dwelling burrows of suspension-feeders in sandstone of the proximal lower shoreface, 1 — *Monocraterion* ichnosp., 2 — *Bergaueria major* Palij, 3 — organism escape structure in sandstone, (B) base of the upper parasequence with feeding-dwelling burrows of deposit-feeders in the mudstone of the distal upper offshore, 1 — *Teichichnus rectus* Seilacher, 2 — Bioturbations of deposit-feeders in the interbedded mudstone and sandstone without sedimentary structures of the proximal lower shoreface, II. Opportunistic, gregarious occurrence of deposit-feeder burrows occurring immediately above the boundary of parasequence set of transgressive system tract: 1 — *Teichichnus* ichnosp., 2 — *Teichichnus rectus* Seilacher, III. Transgressive erosional surfaces: 1 — *Skolithos* ichnosp., dwelling burrow of suspension-feeder in previously burrowed and firm but unlithified sediment, *Glossifungites* ichnofacies example occurring at the parasequence set boundary, 2 — Transgressive erosional surface within the sandstone of proximal upper offshore connected with a rapid increase of relative sea level



Ryc. 4. Schematyczna mapa polskiej części kratonu wschodnioeuropejskiego pokazująca zasięg utworów górnego wendy i dolnego kambru (według Lenzion, 1983; Moczyłowskiej, 1991), z lokalizacją badanego otworu wiertniczego

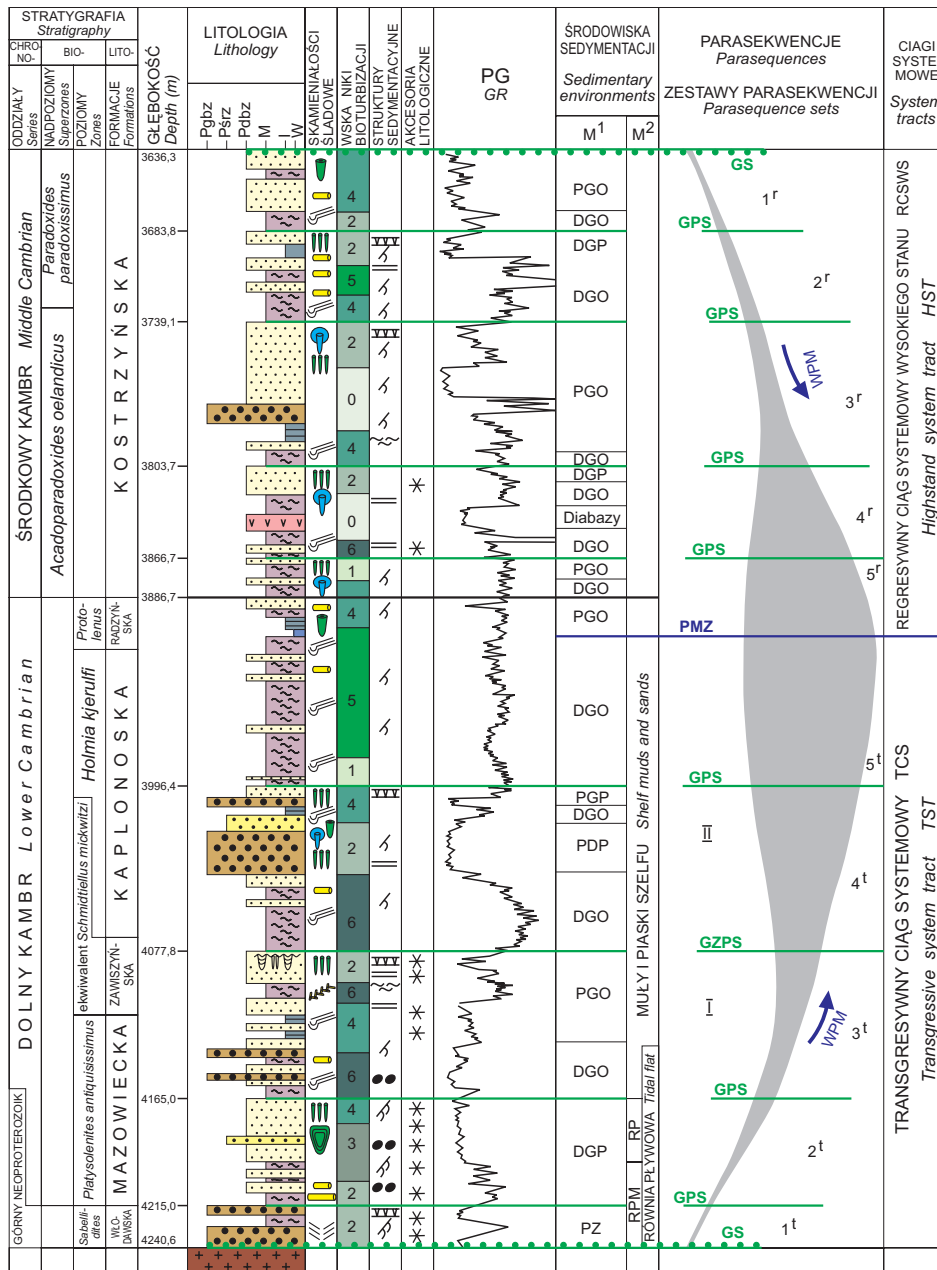
Fig. 4. A sketch-map of the Polish part of the East European Craton showing an extent of the Upper Vendian and Lower Cambrian deposits (after Lenzion, 1983; Moczyłowska, 1991) with localization of investigated well

związane z radykalną wymianą asocjacji skamieniałości śladowych, uprawniającą do poprowadzenia granicy parasekwencji. W dolnokambryjskim profilu podlaskim występuje retrogradacyjne ułożenie parasekwencji, czyli coraz młodsze pakiety osadzają się w kierunku lądu. Każda z parasekwencji stanowi zapis transgresji linii brzegowej, a cały transgresywny, składający się z dwóch zestawów parasekwencji ciąg systemowy, przedstawia historię wędrówki linii brzegowej od głębszych części basenu do jego stref przybrzeżnych. Granica między dolnym (I) i górnym (II) zestawem parasekwencji oznacza przełomowy dla rozwoju sekwencji transgresywnej moment wzrostu względnego poziomu morza. Granicę zestawów wyznacza dobrze wykształcona transgresywna powierzchnia erozyjna z rozwiniętą ichnofacją *Glossifungites* (ryc. 3 III, 1). Bezpośrednio nad nią występuje (ryc. 5) warstwa ciemniejszych mułowców całkowicie przerobionych przez osadożerców. Skamieniałości śladowe są tutaj reprezentowane tylko przez jeden ichnorodzaj *Teichichnus*, tworzący gęsto upakowane w osadzie jamki żerowiskowo-mieszkalne (ryc. 3 II 1, 2), zaburzające pierwotną strukturę osadu. Skamieniałości śladowe i sposób ich występowania wskazują, że po okresie erozji i związanego z nią braku depozycji, w warunkach gwałtownego wzrostu względnego poziomu morza, nastąpiło znaczące pogłębienie się zbiornika i na dłużej utrzymało się w nim środowisko dystalnego górnego odbrzeża z silnym

deficytem tlenu. Spowodował on wystąpienie stresujących warunków środowiskowych, zmuszających zasiedlające osady organizmy osadożerne do przyjęcia oportunistycznej strategii życiowej, która przejawiała się bujnym ich rozwojem. Pozytywnym czynnikiem środowiskowym, który stymulował populację śladotwórców w kierunku oportunistycznego rozwoju, była duża zawartość pokarmowej substancji organicznej, zazwyczaj występująca w niedotlenionych środowiskach płytkomorskich. W zapisie ichnologicznym zjawisko to znalazło swój wyraz w maksymalizacji wskaźnika bioturbizacji osadu — 6, wskazującego na jego całkowitą, ichnologiczną homogenizację.

Proces retrogradacji linii brzegowej kończy się w momencie rozpoczęcia się fazy maksymalnej transgresji, której zapisem jest występująca w profilu Okuniew IG1, na głębokości 3903,0 m warstewka wapieni o miąższości 3 cm. Prawdopodobnie reprezentują one najgłębsze w profilu środowisko. Jest to jednocześnie powierzchnia maksymalnego zalewu (*maximum flooding surface*), oznaczająca najdalsze położenie w głębi lądu najgłębszego w profilu środowiska (Emery & Myers, 1996) i pojawia się w części profilu zaliczonej przez Lenzion (1983) do udokumentowanego biostratygraficznie, dolnokambryjskiego poziomu *Protolenus*. Stwierdzona w dolnokambryjskim profilu podlaskim powierzchnia maksymalnego zalewu nie ma zapisu ichnologicznego.

Powierzchnia maksymalnego zalewu wieńczy okres dominacji środowiska dystalnego górnego odbrzeża. Bezpośrednio nad nią pojawiają się płytsze środowiska sedymentacji, reprezentujące różne strefy przybrzeża. W nadległej części profilu występuje progradacyjne ułożenie parasekwencji, tworzących ciąg systemowy wysokiego stanu (*highstand system tract* — *HST*; Porębski, 1996), tworzących jeden zestaw. Zostało ono stwierdzone w utworach środkowej i wyższej części poziomu *Protolenus* oraz w środkowym kambrze (ryc. 5) i jest związane z regresją zbiornika morskiego. Utwory te cechuje obecność cyklicznie powtarzających się pakietów facjalnych z progresją spływających się ku górze środowisk. W górnej części profilu wzrasta udział osadów piaszczystych i środowisk płytkowodnych, przede wszystkim proksymalnego górnego odbrzeża i dystalnego górnego przybrzeża (ryc. 5). W profilu wyraźnie dominują jamki mieszkalne filtratorów typu *Skolithos*, *Monocraterion* i *Bergaueria*. Każda z wyróżnionych pięciu parasekwencji (1^I–5^I) jest ciałem piaszczystym, odzwierciedlającym linię brzegową. Zestaw parasekwencji jest zapisem progradacji linii brzegowej, wskazującym na jej przesuwanie się od lądu w głąb basenu. Wymiany płytkowodnych asocjacji skamieniałości śladowych (ichnorodzaje *Bergaueria*, *Diplocraterion*, *Monocraterion*, *Skolithos*) przez asocjacje głębszych stref zbiornika (ichnorodzaje *Teichichnus*, *Planolites*) wyznaczają powierzchnie morskiego zalewu (pogłębienia się zbiornika), będące jednocześnie granicami parasekwencji (por. ryc. 5). W stropowej części badanego profilu nie występują najpłytsze środowiska górnego przybrzeża i plaży, wskazujące na końcowy etap regresji zbiornika morskiego. Najprawdopodobniej, reprezentujące je osady zostały usunięte przez erozję przedordowicką.



LITOLOGIA
LITHOLOGY

- piaskowce gruboziarniste
coarse-grained sandstone
- piaskowce średnioziarniste
medium-grained sandstone
- piaskowce drobnoziarniste
fine-grained sandstone
- młukowce
mudstone
- łowce
claystone
- wapienie
limestone
- diabazy
diabase
- podłoże krystaliczne
crystalline basement

SKAMIEŃALOŚCI ŚLADOWE
TRACE FOSSILS

- Skolithos linearis
- Monocraterion isp.
- Rossella isp.
- Treplichnus isp.
- Teichichnus rectus
- Planolites montanus
- Planolites beverleyensis
- Bergaueria major
- struktury ucieczkowe
escape structures
- ichtnofacja Glossifungites
Glossifungites ichtnofacies

WSKA NIKI BIOTURBACJI
(według Droser & Bottjer, 1986)
INDICES OF BIOTURBATION
(after Droser & Bottjer, 1986)

- 0 nie stwierdzono skamieniałości śladowych
no bioturbation recorded
- 1 do 10 % zbioturbowania warstwowania
up to 10 % of bedding disturbed
- 2 10-30 % zbioturbowania warstwowania
10-30 % bedding disturbed
- 3 30-50 % zbioturbowania warstwowania
30-50 % bedding disturbed
- 4 50-70 % zbioturbowania warstwowania
50-70 % bedding disturbed
- 5 50-70 % zbioturbowania warstwowania
bedding is completely disturbed
- 6 całkowita bioturbacja warstwowania
ichtnologiczna homogenizacja osadu
totally ichtnologically homogenized sediment

STRUKTURY SEDYMENTACYJNE
SEDIMENTARY STRUCTURES

- warstwowanie przekątne dużej skali
large-scale cross bedding
- warstwowanie przekątne małej skali
small-scale cross bedding
- laminacja równoległa
horizontal lamination
- warstwowanie smużyście
flaser bedding
- powierzchnie erozyjne
surfaces of erosion
- intraklasty mułowa
intraclasts of mudstones

AKCESORIA LITOLOGICZNE
LITHOLOGICAL ACCESSORIES

- * glaukonit
glauconite

ŚRODOWISKA SEDYMENTACJI
SEDIMENTARY ENVIRONMENTS

- PZ plaża zewnętrzna
foreshore
- DGP dystalne górne przybrzeże
distal upper offshore
- PDP proksymalne dolne przybrzeże
proximal lower shoreface
- PGO proksymalne górne odbrzeże
proximal upper offshore
- DGO dystalne górne odbrzeże
distal upper offshore
- M¹ model rozmieszczenia środowisk sedymentacji na szelfie klastycznym (MacEachern & Pemberton, 1992)
model of distribution of sedimentary environments on clastic shelf (MacEachern & Pemberton, 1992)
- M² model rozmieszczenia środowisk sedymentacji na wybrzeżu pływowym (Reineck & Singh, 1980)
model of distribution of sedimentary environments on tidal coast (Reineck & Singh, 1980)
- RPM równia piaszczysto-mułowa
sand-mudflat
- RP równia piaszczysta
sandflat

STRATYGRAFIA SEKWENCJI
SEQUENCE STRATIGRAPHY

- granica sekwencji
sequence boundary
- granica parasekwencji
parasequence boundary
- powierzchnia maksymalnego zalewu
maximum flooding surface
- granica zestawu parasekwencji
parasequence set boundary
- 1^t - 5^t parasekwencje w transgresywnym ciągu systemowym
parasequences in transgressive system tract
- 1^r - 5^r parasekwencje w ciągu wysokiego stanu parasequences in highstand system tract
- I - II zestawy parasekwencji w transgresywnym ciągu systemowym
parasequence sets in transgressive system tract

WZGLĘDNY POZIOMY MORZA
RELATIVE SEA LEVEL

- krzywa trendów paleobatyometrycznych w sukcesji przybrzeża i odbrzeża
curve of paleobathymetric trends in shoreface to offshore succession
- kierunek wzrostu względnego poziomu morza w sukcesji środowisk
direction of increase of relative sea level in environments succession

Ichnologiczne metody wyznaczania stratygraficznych powierzchni nieciągłości

Wydzielanie jednostek stratygrafii sekwencyjnej bazuje na określeniu rangi i rodzaju powierzchni nieciągłości ograniczających w spągu i w stropie poszczególne jednostki. Pełna weryfikacja powierzchni nieciągłości w profilu pozwala na umieszczenie danej jednostki na właściwym miejscu w hierarchii jednostek wyróżnianych w poszczególnych sekwencjach depozycyjnych.

Wszystkie niżej wymienione rodzaje powierzchni nieciągłości cechuje swoisty zapis ichnologiczny (np. Ghi- baudo i in., 1996), umożliwiający zidentyfikowanie rodzaju powierzchni. Fakt ten ma duże znaczenie praktyczne podczas profilowania rdzeni wiertniczych, gdyż umożliwia szybką identyfikację rodzaju powierzchni nieciągłości i wstępną ocenę stylu architektury środowiskowej sekwencji depozycyjnej. W wysokorozdzielczej stratygrafii sekwencyjnej najwyraźniej czytelne w zapisie ichnologicznym są dwa rodzaje powierzchni nieciągłości:

□ powierzchnie zalewu morskiego (*flooding surfaces*), związane z gwałtownym pogłębieniem się zbiornika morskiego i często, ale nie zawsze z erozją przybrzeżną. Są to jednocześnie granice parasekwencji i zestawów parasekwencji. Powierzchnie wskazujące na wzrost względnego poziomu morza w skali regionalnej, manifestują swoją obecność poprzez bezpośrednie wystąpienie nad asocjacja- mi płytkowodnymi skamieniałości śladowych asocjacji głębokowodnych. Struktura ekologiczna takiej asocjacji i wszystkie jej elementy (struktura behawioralna, troficzna i grupy ekologiczne) muszą całkowicie różnić się od struktury ekologicznej asocjacji leżącej poniżej w profilu (por. ryc. 3I A, B). Powierzchnie te są wskaźnikiem szokowej zmiany warunków ekologicznych w zbiorniku, przekraczającej tolerancję ekologiczną organizmów płytkowodnych i powodującą nagłe, całkowite zniszczenie ich populacji. Należy szczególnie mocno podkreślić fakt, że w praktyce ichnologicznej tylko tak radykalne, rejestrowane w profilu wymiany asocjacji skamieniałości śladowych wskazują na granice parasekwencji.

□ powierzchnie erozji przybrzeżnej, tworzące się wskutek niszczącego działania falowania podczas powolnego wzrostu względnego poziomu morza lub jego stabilizacji w trakcie cofania się linii brzegowej i występujące w progradacyjnych zestawach parasekwencji (regresywne powierzchnie erozyjne — *regressive surfaces of erosion*). Inny typ powierzchni erozyjnych jest związany z progresją

←

Ryc. 5. Reprezentatywny profil otworu wiertniczego Okuniew IG1, pokazujący środowiska sedymentacji i wysokorozdzielczą stratygrafię sekwencji dolno i środkowokambryjskiej, transgresywno-regresywnej sukcesji zachodniej części obniżenia podlaskiego. Biostratygrafia według Lendzion (1983); Moczydłowskiej (1991) i Pacześnej (1996)

Fig. 5. Representative Okuniew IG1 well section showing sedimentary environments and high-resolution sequence stratigraphy of the Lower and Middle Cambrian transgressive-regressive sequence from the western part of the Podlasie Depression. Biostratigraphy after Lendzion (1983); Moczydłowska (1991) and Pacześna (1996)

linii brzegowej w kierunku lądu i występuje w retrogradacyjnych zestawach parasekwencji (transgresywne powierzchnie erozyjne — *transgressive or ravinement surfaces of erosion*) (ryc. 3 III ,2) podczas gwałtownego wzrostu względnego poziomu morza. Oba rodzaje powierzchni często wyznacza specyficzny zapis ichnologiczny w postaci asocjacji *Glossifungites*, zdefiniowanej po raz pierwszy w kategoriach ichnofacji (Frey & Seilacher, 1980). Występujące w tej asocjacji pionowe jamki mieszkalne filtratorów, najczęściej typu *Monocraterion*, *Diplocraterion*, *Skolithos*, *Arenicolites*, *Cylindrichnus*, *Bergaueria* i rzadziej ukończone posadowione w osadzie *Rhizocorallium*, są pozbawione otuliny ścianek ponieważ były passywnie wypełnione osadem i zostały zbudowane przez organizmy w osadzie już częściowo skonsolidowanym, przerobionym przez uprzednio tam zamieszkujących osadożerców. Występowanie dobrze wykształconej otuliny ścianek w wymienionych wcześniej ichnorodzajach, nie wskazuje na ich przynależność do ichnofacji *Glossifungites*. Asocjacja *Glossifungites* odpowiada przerwie w depozycji osadu po zakończeniu procesu erozji a przed rozpoczęciem sedymentacji nadległej warstwy (MacEachern i in., 1992, 1998). Transgresywna powierzchnia erozyjna z wyraźnie wykształconą ichnofacją *Glossifungites* występuje w retrogradacyjnym ciągu parasekwencji dolnego kambru obniżenia podlaskiego na granicy zestawów (I i II) parasekwencji (ryc. 3III, 1).

Uwagi końcowe

Do najważniejszych ograniczeń metody ichnofacjalnej należy brak ciągłości zapisu ichnologicznego, spowodowany różnicami w potencjale zachowania się śladów aktywności życiowej organizmów, wykazywanymi przez różne typy litologiczne osadów. Inną przyczyną braku skamieniałości śladowych w osadach jest absencja organizmów mogących pozostawić ślady działalności życiowej, wywołana przez niesprzyjające warunki środowiskowe, uniemożliwiające egzystencję śladotwórców w siedlisku. W takich przypadkach należy wykorzystać wszystkie inne, dostępne dla danego profilu metody umożliwiające wykonanie, nawet w ograniczonym zakresie, analizy facjalnej, prowadzącej do interpretacji środowisk sedymentacji. Należy do nich klasyczna analiza sedymentologiczna oraz interpretacja litologii osadów z krzywych profilowań geofizycznych i wynikające z niej bardzo ograniczone wnioski paleośrodowiskowe. Niestety, obie wspomniane metody dostarczają danych o nieporównywalnie niskim stopniu precyzji typowania środowisk sedymentacji w stosunku do metody ichnofacjalnej. Fakt ten ma szczególne znaczenie w przypadku analizowania sekwencji depozycyjnej pod kątem możliwości wykonania w niej wydzieleni wysokorozdzielczej stratygrafii sekwencyjnej. W profilach stwierdza się również odcinki, w których brak jest skamieniałości śladowych i struktur sedymentacyjnych. Ograniczonych informacji o rodzaju środowiska sedymentacji mogą wtedy dostarczyć analogie z występującym w spągu lub w stropie analizowanego odcinka profilu środowiskiem sedymentacji. Często interpretacja środowiska w takich odcinkach profilów jest niemożliwa do wykonania. Innym, poważnym problemem, uniemożliwiającym lub wydatnie zawężającym zakres i efektywność wszystkich metod analizy facjalnej w

badaniu architektury środowiskowej basenów sedymentacyjnych, jest niski uzysk rdzeni wiertniczych oraz częste przerwy w rdzeniowaniu otworów wiertniczych.

Ichnofacjalna metoda wyróżniania i opisu środowisk sedymentacji jest szczególnie przydatna w analizowaniu ichnospektrow w klastycznych i klastyczno-węglanowych sekwencjach dostępnych w materiale rdzeniowym. Wysoki wskaźnik częstości jej zastosowań w praktyce (świadczy o tym szybko w ostatnich latach wzrastająca liczba publikacji poświęconych facjalnym i stratygraficznym zastosowaniom skamieniałości śladowych), wynika z dużej frekwencji występowania skamieniałości śladowych w klastycznych utworach środowisk szelfowych prawie wszystkich systemów geologicznych. O jej zastosowaniach w analizie facjalnej decyduje również szybkość z jaką dostarcza ona wstępnych, podstawowych danych o rodzajach środowisk sedymentacji i ich sukcesji, wskazującej na trendy paleobatymetryczne w sekwencji depozycyjnej już podczas profilowania otworu wiertniczego. Fakt ten ułatwia przyjęcie odpowiedniej strategii badawczej w dalszej, szczegółowej analizie środowisk sedymentacji zarówno w skali kilku profili, jak i całego basenu sedymentacyjnego.

Literatura

- ALVARO J. J. & VENNIN E. 1998 — Stratigraphic signature of a terminal Early Cambrian regressive event in the Iberian Peninsula. *Canadian J. Earth Sci.*, 35: 402–411.
- ANDERSON B. G. & DROSER M. L. 1998 — Ichnofabrics and geometric configurations of *Ophiomorpha* within a sequence stratigraphic framework and an example from the Upper Cretaceous US Western Interior. *Sedimentology*, 45: 379–396.
- CASTLE J. W. 1998 — Regional sedimentology and stratal surfaces of a Lower Silurian clastic wedge in the Appalachian foreland region. *J. Sediment. Res.*, 68: 1201–1211.
- CURRAN H.A. ed. 1985 — Biogenic structures: Their use in the interpreting depositional environments. SEPM, Spec. Publications, 35.
- DROSER M. L. & BOTTJER D. J. 1986 — A semiquantitative field classification of ichnofabric. *J. Sediment. Petrol.*, 56: 558–559.
- EMERY D. & MYERS K. J. 1996 — Sequence Stratigraphy. Blackwell Science, United Kingdom.
- FREY R.W. & SEILACHER A. 1980 — Uniformity in marine invertebrate ichnology. *Lethaia*, 13: 183–207.
- FREY R.W. & PEMBERTON S.G. 1987 — The *Pselonichnus* ichnocoenose and its relationship to adjacent marine and nonmarine ichnocoenoses along the Georgia coast. *Bull. Canadian Petrol. Geol.*, 35: 333–357.
- GHIBAUDO G., GRANDESSO P., MASSARI F. & UCHMAN A. 1996 — Use of trace fossils in delineating sequence stratigraphic surfaces (Tertiary Venetian Basin, north-eastern Italy). *Paleogeogr. Paleoclimat. Paleoecol.*, 120: 261–279.
- JAWOROWSKI K., 1997 — Warunki depozycji ciał piaszczystych kambru dolnego i środkowego w polskiej części platformy wschodnioeuropejskiej. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 377: 1–107.
- KRAWINKEL H. & SEYFRIED H. 1996 — Sedimentologic, paleoecologic, taphonomic and ichnologic criteria for high-resolution sequence analysis: a practical guide for the identification and interpretation of discontinuities in shelf deposits. *Sediment. Geol.*, 102: 79–109.
- LENDZION K. 1983 — Biostratygrafia osadów kambru w polskiej części platformy wschodnioeuropejskiej. *Kwart. Geol.*, 27: 669–694.
- MACEACHERN J.A. & PEMBERTON S.G. 1992 — Ichnological aspects of Cretaceous shoreface successions and shoreface variability in the western interior seaway of north America. [In:] Applications of ichnology to petroleum geology. A Core Workshop. SEPM Core Workshop, 17: 34–57.
- MACEACHERN J.A., RAYCHAUDHURI I. & PEMBERTON S.G. 1992 — Stratigraphic applications of the Glossifungites ichnofacies: delineating discontinuities in the rock record. [In:] Applications of ichnology to petroleum geology. A Core Workshop. SEPM Core Workshop, 17: 169–199.
- MACEACHERN J.A., ZAITLIN B.A. & PEMBERTON S.G. 1998 — High-resolution sequence stratigraphy of early transgressive deposits, Viking Formation, Joffre Field, Alberta, Canada. *AAPG Bull.*, 82: 729–755.
- MOCZYDŁOWSKA M. 1991 — Acritarch biostratigraphy of the Lower Cambrian and the Precambrian–Cambrian boundary in south-eastern Poland. *Fossils and Strata*, 29.
- PACZEŚNA J. 1996 — The Vendian and Cambrian ichnocoenoses from the Polish part of the East European Platform. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, 152.
- PEMBERTON S.G. (ed.) 1992 — Applications of ichnology to petroleum exploration. A Core Workshop. SEPM Core Workshop, 17, Calgary.
- PEMBERTON S.G. & FREY R.W. 1985 — The Glossifungites ichnofacies: modern examples from the Georgia coast, U.S.A. In: H.A. Curran, ed., Biogenic Structures: Their Use in Interpreting Depositional Environments. SEPM Spec. Publ., 35: 237–259.
- PEMBERTON S.G., FREY R.W., RANGER M.J. & MACEACHERN J.A. 1992a — The conceptual framework of ichnology. [In:] Pemberton S.G. ed., Applications of ichnology to petroleum exploration Core Workshop. SEPM Core Workshop, 17: 1–32.
- PEMBERTON S.G., MACEACHERN J.A. & FREY R.W. 1992b — Trace fossils facies models: environmental and allostratigraphic significance. [In:] R.G. Walker, N.P. James, eds., Facies Models — Response to Sea Level Change. Geological Association of Canada, St. John's, Newfoundland: 47–72.
- PEMBERTON S.G. & MACEACHERN J.A. 1995 — The sequence stratigraphic significance of trace fossils: examples from the Cretaceous foreland basin of Alberta, Canada. [In:] J.C. Van Wagoner, G. Bertam, eds., Sequence stratigraphy of foreland basin deposits-outcrop and subsurface examples from the Cretaceous of North America. AAPG Memoir, 64: 429–475.
- POPE M. & READ J.F. 1997 — High-resolution surface and subsurface sequence stratigraphy of late Middle to Late Ordovician (late Mohavkian–Cincinnatian) foreland basin rocks, Kentucky and Virginia. *AAPG Bull.*, 81: 1866–1893.
- PORĘBSKI S.J. 1996 — Podstawy stratygrafii sekwencji w sukcesjach klastycznych. *Prz. Geol.*, 44: 995–1006.
- REINECK H. E. & SINGH I. B. 1980 — Depositional Sedimentary Environments. Springer-Verlag, Berlin.
- SAVRDA C.E. 1991 — Ichnology in sequence stratigraphic studies. An example from the Lower Paleocene of Alabama. *Palaios*, 6: 39–53.
- SEILACHER A. 1967 — Bathymetry of trace fossils. *Marine Geol.*, 5: 413–428.
- SIGGERUD E. I. H. & STEEL R. J. 1999 — Architecture and trace fossil characteristics of a 10,000–20,000 year, fluvial-to-marine sequence, SE Ebro Basin, Spain. *J. Sedim. Res.*, 69: 365–383.
- SNEDDEN J.W. 1991 — Origin and sequence stratigraphic significance of large dwelling tracks in the Escondido Formation (Cretaceous, Texas, USA). *Palaios*, 6: 541–552.
- VAN WAGONER J.C., MITCHUM R.M., CAMPION K.M. & RAHMANIAN V.D. 1992 — Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores and outcrops. AAPG Methods in Exploration Series, 7.