

*Choć pojęcie skamieniałości kojarzy się głównie
z kośćmi, paleontolodzy znajdują także
szczątki zwierząt bezszkieletowych.
Jak doszło do ich fosylizacji?*

Skamienie najstarszych

JERZY DZIK
Ilustracje autora

niałości zwierząt



W NIEKTÓRYCH MIEJSCACH naszego globu, m.in. w przełomie Chorbusuonki na północy Syberii (*zdjęcie*) i na wybrzeżu Morza Białego odkryto doskonale zachowane skamieniałości pierwotnych zwierząt, takich jak *Andiva* (*wstawka*). Jest to przedstawiciel zwierząt o segmentowanym ciele (Dipleurozoa) występujący w okresie wendy na terenie obecnych Zimnich Gór. W aulipolarnych warunkach wietrzenia skała zachowała pierwotne szaroniebieskie zabarwienie od domieszki związków żelazawych (m.in. pirytu).

Najstarszym zwierzęciem, odkrytym w środkowej Europie,

jest prawdopodobnie *Xenusion auerswaldae*. Prawie sto lat temu odcisk jego ciała w piaskowcowym gładzie narzutowym trafił do kolekcji szlacheckiego konwentu kanoniczek w Heiligengrabe w Brandenburgii. Jego przelozona, panna von Auerswald, przekazała cenny okaz znakomitemu geologowi niemieckiemu J.F. Pompeckiemu, który w 1927 roku nazwał gatunek na jej cześć. *Xenusion*, uznany za pratchawca z przełomu prekambriu i kambriu, został gruntownie omówiony w podręcznikach paleontologii i zbadany przez kolejne pokolenia paleontologów. Nadal jednak nie wiadomo było, jak ciało tego podobnego do gasienicy zwierzęcia, pozbawionego jakiegokolwiek szkieletu czy nawet sztywnych okryw, mogło pozostawić ślad w powoli przecież kamieniejącym piasku. Do rozwikłania zagadki przyczyniło się odkrycie kolejnego okazu z tego gatunku w gładzie znalezionej na wyspie Hiddensee koło Rostoku. Oba skalne bloki zostały 20 tys. lat temu wyrwane przez lądolód skandynawski prawdopodobnie z wychodni piaskowca Kalmarsund w południowej Szwecji. Drugi *Xenusion* znalazł się w 1979 roku w słynnym Geiseltalmuseum we wschodniemieckim Halle.

Nie jest to może efektowny eksponat muzealny, ale dla badaczy niezwykle cenny – nie tylko przedstawia przednią część ciała brakującą pierwszemu okazowi, ale także rzuca nowe światło na proces powstawania tego rodzaju skamieniałości. Okazało się bowiem, że jego ciało jest zachowane trójwymiarowo, wypełnione wewnątrz skalą i do tego tkwi w niej ukośnie w stosunku do warstwowania. W jaki jednak spo-

sób żywe czy martwe zwierzę mogło zostać wypchane piaskiem?

Odpowiedź wydaje się wprawdzie zaskakująca, lecz w istocie jest banalnie prosta. Walcowate ciało drugiego okazu *Xenusion auerswaldae* było bowiem rozdarte wzdłuż strony brzusznej, a jego ścianki rozwarły i zmięły po bokach [ilustracja na stronie 69]. To była wylinka! Miotana prądem wypełniła się piaskiem, który ją zakotwiczył, umożliwiając przykrycie kolejnymi warstwami osadu. Zewnętrzne podobieństwo do dzisiejszych pratchawców o miękkich powłokach ciała okazało się więc powierzchowne. Zwierzę okryte było dość sztywnym chitynowo-białkowym oskórkiem – na grzbiecie twardym, wzmocnionym dodatkowo rzędami guzów i uzbrojonym kolcami, a na brzuchu stosunkowo miękkim. Musiało więc okresowo zrzucić oskórek, by rosnąć.

Walcowatym kształtem i prostotą budowy *Xenusion* przypomina obleńce i łatwo sobie wyobrazić, jak z pelzającego po dnie pierścieniowanego prarobaka powstało zwierzę poruszające się na zmodyfikowanych wyrostkach pierścieni. To wnioskowanie oparte na materiale kopalnym o 10 lat wyprzedziło odkrycie biologów molekularnych, że wszystkie zwierzęta liniejące (Ecdysozoa: obleńce, niesporczaki, pratchawce i stawonogi) pochodzą od wspólnego przodka. Oznacza to, że sztywne okrywy ciała nie są wynalazkiem stawonogów, lecz zostały przez nie odziedziczone po praobłęczkach. *Xenusion* jest więc ogniwem łączącym różne typy świata zwierzęcego.

Jak to jednak możliwe, że stercząca ukośnie z dna, bogata w pożywny biał-

ko wylinka *Xenusion* nie uległa rozkładowi podczas odkładania się kolejnych warstewek piasku? Co więcej, pozostała nienaruszona dopóty, dopóki osad nie skamieniał. Dzisiaj byłoby to niemożliwe. Takimi szczątkami żywi się mnóstwo mniejszych i większych organizmów, żyjących w toni wodnej i między ziarnami piasku. Trzeba jednak pamiętać, że większość z nich to drobne stawonogi, których w czasach, kiedy żył *Xenusion*, jeszcze nie było.

Przynajmniej pod tym względem warunki fosylizacji w końcu prekambriu i na początku okresu kambryjskiego były niepodobne do współczesnych. Dodatkowych argumentów na rzecz tej hipotezy dostarczyły dane o prekambryjskich skamieniałościach z Namibii.

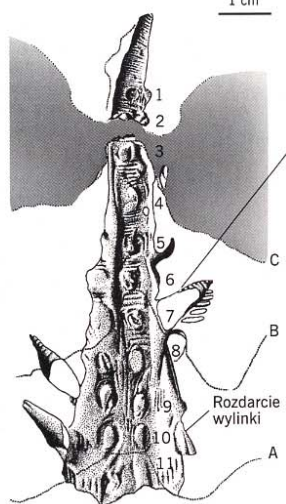
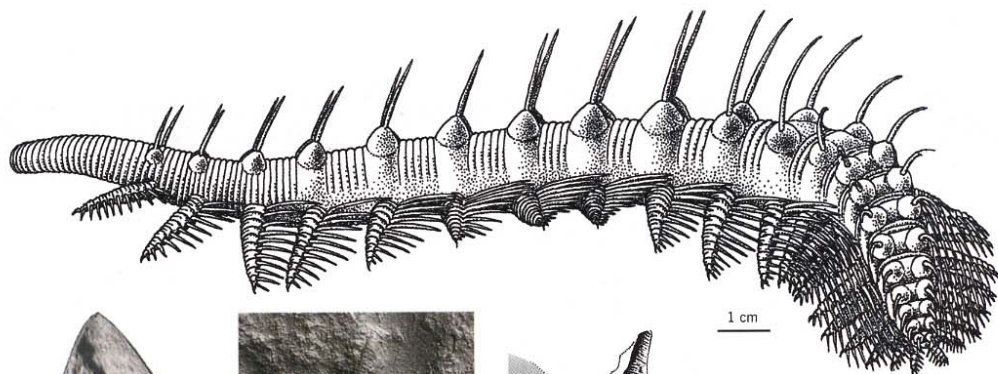
Tajemnicze twory

W 1995 roku SPĘDZIŁEM kilka dni w gościnie u Hansa Pfluga, emerytowanego profesora Justus-Liebig Universität Gießen. Zgromadził on w swoim domu znaczną część zebranych do tego czasu skamieniałości prekambryjskich zwierząt z kwarcytu Kuibis z Namibii. Pierwszym paleontologiem, który badał te materiały, był w latach dwudziestych Georg Gürich, ówczesny dyrektor Instytutu Kolonialnego (Kolonialinstitut) w Hamburgu (obecnie Hamburgskie Światowe Archiwum Gospodarki), poprzednio docent w niemieckim wówczas Uniwersytecie Wrocławskim (Breslau Universität) i znakomity badacz Gór Świętokrzyskich. Namibia była do 1915 roku kolonią niemiecką (pod nazwą Niemiecka Afryka Południowo-Zachodnia – przyp. red.) i znaleziska pracujących tam geologów trafiały do Hamburga. Gürich opisał i prawidłowo – jak się dopiero niedawno okazało – zinterpretował je w 1930 roku, jednak nie zdawał sobie sprawy z ich rzeczywistego wieku.

Namibijskie skamieniałości nie miały później szczęścia do kompetentnych badaczy. Wypisywano o nich wręcz niestworzone historie. Szczególnie dotyczyły one obłych ciał nazywanych *Ernietta*. Nie tylko bowiem zachowały się trójwymiarowo w piaskowcu, jak bałtycki *Xenusion*, i występują masowo, tworząc swego rodzaju kolonie, ale ponadto każdy ze znalezionych okazów ma inny kształt. Klasyfikowano więc je raczej jako rośliny niż zwierzęta.

Przegląd / Miękkie skamieniałości

- Wiedza o początkach świata zwierząt opiera się przede wszystkim na znaleziskach odcisków ich miękkich ciał na powierzchni ławic skalnych z kończącego erę proterozoiczną okresu wendu (560–543 mln lat temu) oraz sfosfatyzowanych tkanek, a także szkieletów, z kambriu – początku ery paleozoicznej.
- Kontrast w sposobach zachowania skamieniałości po obu stronach granicy er sprawia wrażenie faunistycznego trzęsienia ziemi, odzwierciedla jednak przede wszystkim zmianę warunków panujących na powierzchni morskiego dna. W kambrie pojawiły się drapieźniki wymuszające na innych zwierzętach wytworzenie mineralnego ochronnego szkieletu lub skryte życie w mule, co doprowadziło do zniszczenia mat sinicowych.
- Związek między ewolucją a jej kopalnym zapisem jest ścisły, ale nie bezpośredni. Odtworzenie rzeczywistego następstwa zdarzeń wymaga więc przede wszystkim zrozumienia, jak skamieniałości najpierwotniejszych zwierząt nie mających mineralnego szkieletu powstały i przetrwały pół miliarda lat.
- Zapis kopalny informujący o anatomii i trybie życia tych zwierząt bywa czasem – wbrew powszechnej opinii – zaskakująco kompletny.



Odnóże wypelnione piaskiem

SZCZĄTKI jednego z najstarszych europejskich zwierząt, *Xenusion auerswaldae*, zachowane w polodowcowych glazach narzutowych okazały się wylinkami. Powyżej rekonstrukcja zwierzęcia, a z lewej odciski w kamieniu, z prawej rysunek ukazujący wypelnienie wylinki kolejnymi warstwami piasku (A, B, C). 1-11 – pierścienie ciała.

Uderzyło mnie wówczas wypelnienie wnętrza okazów *Ermetia* osadem grubszym niż występujący w ich otoczeniu. Co więcej, dolna część zawierała prawie czysty piasek kwarcowy, zaś górna – brudny drobnopziarnisty piasek wymieszany z mulem. Nabrałem pewności co do ich pochodzenia, gdy uszeregowałem okazy *Ermetia* według kształtów, od półkulistych przez kropłowe po stożkowate.

Kształty takie otrzymał eksperymentalnie w latach pięćdziesiątych Stanisław Dżułyński z Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie, umieszczając warstwę piasku nad nasyconym wodą łem (czyli w warunkach odwróconej gęstości osadu – to częste zjawisko w trzeciorzędowym fliszu karpackim) i doprowadzając do przywrócenia stabilności układu. Powstawały wówczas sople piasku spływające w głąb łu i rozplaszczające się ostatecznie na jego dnie, tzw. pograży. Przybierały więc podobne kształty, jak „ciała” *Ermetia* albo wielokątne twory piaszczyste z wczesnokambryjskiej formacji piaszkowca Mickwitzia w Szwecji.

Przed stu laty zaliczono je do meduz, a znakomity badacz śladów morskich zwierząt bezkręgowych, Adolf Seilacher z Tübingen Universität oraz Yale University uważał je za wypelnienie jamy ciała hipotetycznych „koralu piaszczystych” (*Psammocorallia*). Nie potrafił jednak wytłumaczyć układu warstw piasku w ich wnętrzach. Zagadkę tę rozwiązał dopiero młody szwedzki geolog Sören Jensen z Uppsala Universitet.

Okazało się, że struktury te wcale nie są typowymi skamieniałościami. To pod ciężarem świeżo usypanego piasku maty sińcowe pokrywające warstwę uwodnionego mułu zanurzały się wien kropkami przypominającymi wielkością i kształtem chińskie pierożki bao-dzy. Zaczątki kropki formowały się w zagłębieniach maty, gdzie nacisk piasku był nieco większy.

Kształt skamieniałości *Ermetia* nie ma więc nic wspólnego z wyglądem samych zwierząt. To przysypane piaskiem i pograżające się w mule kolagenowe błony, wyścielające umięśnione jamy ich ciał. W porównaniu z matami sińcowymi

mi z piaszkowca Mickwitzia błony pochodzące z *Ermetia* były bardzo elastyczne, dzięki czemu wytworzyły zadziwiająco różnorodne formy. Nadal jednak nie było wiadomo, w jaki sposób doszło do utrwalenia nie tylko kształtu organicznej błony, ale i szczegółów morfologii jej powierzchni. Struktury te musiały przetrwać dostatecznie długo, by doszło do skamienienia warstwy piaszkowca. A może odbyło się to w inny sposób? Na wyjaśnienie nie trzeba było długo czekać. Dostarczyły go skamieniałości pochodzące ze skał z kończącego prekambry okresu wendu, odłaniających się na brzegach Morza Białego.

Całun ediakarski

NA OGROMNYCH PRZESTRZENIACH północnej Rosji rozpościera się bagnista tajga z cherlawymi świerkami, dochodząc aż do białomorskich wybrzeży. W pobliżu Archangielska, na najbardziej wysuniętym cyplu nad klifem, nazwanym Zimnie Gory (Zimowe Góry), znajduje się automatyczna latarnia morska. Kilka ki-

Początki ewolucji zwierząt

Ziemia powstała około 4600 mln lat temu, ale dopiero mniej więcej przed 3800 mln lat, gdy zakończyło się bombardowanie jej powierzchni planetoidami, mogło pojawić się na niej życie. Pierwszymi jego zwiastunami były bakterie i sinice. Zwierzęta wielokomórkowe powstały zapewne nie wcześniej niż miliard lat temu, ale jednoznaczne dowody ich istnienia pochodzą sprzed 560 mln lat, z kończącego erę proterozoiku okresu wendu. W sylurze istniały już wszystkie podstawowe grupy świata zwierzęcego.

	Era	Okres	(mln lat temu)	Etapy historii świata zwierząt
PREKAMBR	ARCHAIK PROTEROZOIK		4600–2500	Brak śladów życia zwierzęcego
		Dolny	2500–1600	Brak śladów życia zwierzęcego
		Ryfej	1600–650	Powstanie zwierząt jednokomórkowych
		Wend	650–543	Pojawienie się licznych morskich zwierząt, niepodobnych do współczesnych, m.in. <i>Ernietta</i> , <i>Kimberella</i> , <i>Andiva</i> , <i>Dickinsonia</i> , <i>Yorgia</i> i <i>Petalonamae</i> , oraz pierwszych zwierząt wyposażonych w szkielet mineralny
PALEOZOIK				
		Kambr	543–495	Wyodrębnienie się większości typów świata zwierzęcego, w tym dennych mięczaków (być może były nimi też <i>Didymaulichnus</i> i <i>Psammichnites</i>), ryjących w mule obleńców (np. <i>Phycodes pedum</i>), morskich „pratchawców” (m.in. <i>Xenusion auerswaldae</i>), stawonogów, w tym trylobitów (okres ich szczególnie dużej różnorodności), żebroplawów (<i>Maotianoascus</i>), osiadłych szkarłupni, kolonijnych pióroskrzelnych półstrunowców (graptolity) oraz strunowców (<i>Yunnanozoon</i> i konodonty); rafały tworzyły wapienne gąbki (archeocyaty)
		Ordowik	495–440	Różnicowanie konodontów, pojawienie się pancernych bezszczękowców; pierwsze kolonijne koralowce rafowe i ruchliwe szkarłupnie, rozkwit ramienionogów i mszywiolów
		Sylur	440–417	Pojawienie się pierwszych ryb (akantodów) i ich różnicowanie (plakodermi, pierwsze ryby kostnoszkieletowe); ekspansja roślin i zwierząt na lądy

lometrów na południe od niej, w miejscu, gdzie piaszczysty brzeg podmywany przez fale osuwa się ogromnymi płatami po podcięciach go ilach, są najlepsze na świecie odsłonięcia skał wendu z doskonale zachowanymi odciskami skamieniałych zwierząt, jak *Dickinsonia* [ilustracja na stronie 71]. Przewarstwienia wulkanicznego pyłu pozwoliły na radiometryczne oznaczenie ich wieku na około 555 mln lat.

O prekambryjskich skamieniałościach znad Morza Białego badacze wiedzieli od dawna. Do ich poznania ogromnie przyczyniło się odkrycie przed kilku laty dwu pokładów z odciskami, których pod względem jakości nie da się z niczym porównać. Jednym z jego autorów był Andriej Iwanow z Instytutu Paleontologicznego Rosyjskiej Akademii Nauk w Moskwie, mój współpracownik od czasów naszej ekspedycji w okolice Jakucka w 1987 roku, który rok po odkryciu przywiózł do Warszawy częściowo opracowany przez siebie materiał. Okazało się, że w białomorskim kluwie występują gatunki podobne jak w skałach Namibii i sławnym stanowisku Ediacara w Australii.

Skamieniałości z Zimnich Gor zostały zachowane zarówno w sposób charakterystyczny dla fosyliów namibijskich (trójwymiarowo wewnątrz skały), jak i typowy dla ediakarskich (wkłęsłe odciski na dolnej powierzchni warstwy piaszczystej). Co więcej, nierzadkie są okazy, które częściowo wnikają w jej głąb. Stan zachowania jest w obu przypadkach w zasadzie identyczny: utrwała je powłoka osadu scementowanego jedną z najpospolitszych form krystalicznych siarczku żelaza – pirytem. To właśnie szybka cementacja umożliwiła tak dokładne utrwalenie struktury powierzchni miękkiego ciała, że jej szczegóły przetrwały przemianę osadu w litą skałę – proces trwający równie długo dziś, jak w prekambrze.

W skałe zachowały się też kolejne stadia zapadania się szczątków zwierzęcia, dzięki czemu dało się odtworzyć jego budowę wewnętrzną. Najpierw osad przejmował miejsce po narządach wypełnionych płynem; najdłużej proces ten trwał w przypadku organów, których wnętrze zajmowały zwarte tkanki, komórki rozrodcze lub treść pokarmowa. Okazało się, że skamieniały w ten sposób

zwierzęta to organizmy o całkiem złożonej budowie, o czym znaleźniki z Namibii i Australii dawały dotąd jedynie nikielne wyobrażenia.

Zdumiewające, jak w różnych ośrodkach badawczych dochodzi się równocześnie do zbliżonych wniosków. W 1999 roku ukazała się nasza praca, w której sugerowaliśmy, że przyczyną doskonałego zachowania skamieniałości białomorskich jest ich wczesna cementacja pirytem powstałym z rozkładu maty sinicowej. Niemal jednocześnie opublikowany został artykuł wnikliwego badacza skamieniałości z Ediacary, Jamesa G. Gehlinga z South Australian Museum w Adelajdzie, postulujący to samo. Nazwał on to zjawisko „ediakarską maską pośmiertną”.

Materiał australijski (podobnie zresztą jak namibijski) nie zawiera piryty, który w warunkach pustynnych uległ utlenieniu i wymyciu, a zatem wnioskowanie Gehlinga było pośrednie. Tymczasem warstwy skalne odsłonięte w kluwie Zimnich Gor są niemal nie zmienione od czasów prekambru, nie uległy bowiem deformacjom tektonicznym. Nigdy nie były przykryte grubym, powodującym metamorfizm nadkładem młodszych

szych skał, również wietrzenie nie zachodzi tutaj tak intensywnie jak w klimacie gorącym. Zachował się więc nie tylko piyt cementujący piasek nad skamieniałością, ale nawet mata sinicowa, na której zwierzę spoczywało.

Gehling zauważył, że niektóre z ediakarskich odcisków mają poprzeczne pęknięcia, ale uskoki zmniejszają się stopniowo ku górze. Powstały zatem, gdy piasek był jeszcze miękki. Skamieniałości uformowały się, zanim osad stwardniał w wyniku cementacji. Ta błyskotliwa konstatacja znalazła potwierdzenie w sposobie zachowania znalezisk z Zimnich Gor.

Ważnych informacji pozwalających na zrozumienie istoty tego zjawiska dostarczył jeden z najbogatszych w skamieniałości pokładów w kłifie białomorskim, gdzie powszechne są odciski workowatego organizmu o nazwie *Kimberella*. Pokrywają one dolną powierzchnię soczewkowatych ciał piaszkowcowych [ilustracja na stronie 72], niesłusznie uznanych przez pierwszych badaczy za wypełnienie kanałów prądowych. W rzeczywistości są to pograży Stanisława Dżułyńskiego – rezultat lokalnego przemieszczania się piasku pod własnym ciężarem w głąb niższej leżącej warstwy nasyconego wodą ilu.

Nie powstaje wówczas poziomy czy przekątny układ warstwowania jak w przypadku zwykłego wypełnienia zagłębień w dnie, ale równoległy do wypukłej dolnej powierzchni pograży, która powiększała się podczas wyginania z powodów czysto geometrycznych. W normalnych warunkach, na przykład we fliżu karpackim, pojawia się wtedy prążkowanie z widocznymi kierunkami

przebiegu odesktałcenia. Nie dotyczy to jednak soczewek z *Kimberella*. Tu powierzchnia graniczna między piaskiem a ilem pozostała gładka, pojawiły się natomiast na niej liczne rozstępy. Oznacza to, że piasek odgraniczała od ilu jakaś stosunkowo sztywna, ale i podatna na rozerwanie błona – „ediakarski całun”, w którym odcisnęły się ciała spoczywających na nim zwierząt. Liczne zawierające piyt nitkowate kolonie sinic dowodzą, że była to mata sinicowa. Soczewkowate twory piaszkowcowe warstwy z *Kimberella* różnią się zatem od szwedzkich „Psammocorallia” jedynie rozmiarami.

Ale to nie koniec zadziwiającego bogactwa informacji zawartych w kłifie Zimnich Gor. Nierzadko odciski ciał wendyjskich organizmów poprzecinane są rozstępami, przez które wpływały w głąb ilu wąskie języki piasku. To dowód na prawdziwość założenia Gehlinga, że powstanie odcisku poprzedzało całkowitą cementację osadu. Najwyraźniej piasek twardniał początkowo tylko przy samej powierzchni maty sinicowej. Osad był najprawdopodobniej stabilizowany przez słuzowaty bezpostaciowy siarczek żelaza, z którego następnie wykrystalizował piyt.

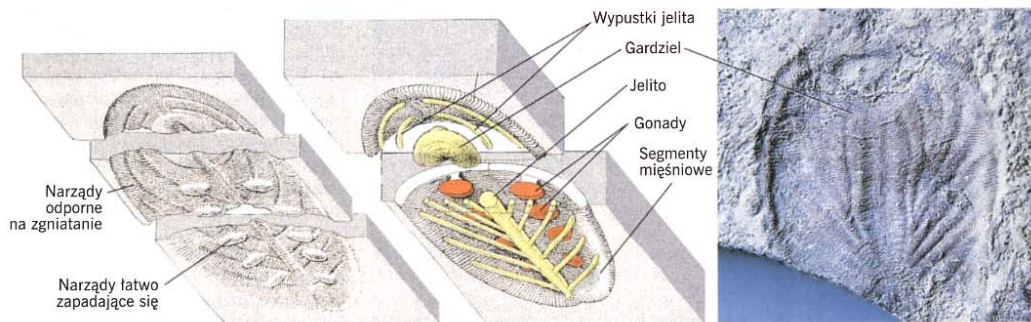
Zdarza się, że język piasku wypływający z rozstępu przecinającego odcisk nie wnika zbyt daleko w głąb warstwy i zachowuje na powierzchni ornamentację właściwą dla skamieniałości. Oznacza to, że zagroziły mu drogę powłoki ciała zwierzęcia. W podobny sposób powstawały odciski *Ernieeta* w Namibii. Osad nie tylko więc pozostawał płynny po ich uformowaniu, ale przez długi czas nienaruszone były również błony kamieniejącego organizmu.

To kolejny dowód, że warunki, w jakich powstawały skamieniałości ediakarskie, różniły się od panujących w osadach dennych dzisiejszych mórz. Mamy jednak powody, by sądzić, że nie były one typowe także dla mórz prekambryjskich.

Ogrody śmierci

SKAMIENTAŁOŚCI ODKRYTE w Ediacarze zadziwiły badaczy niezwykle różnorodnością organizmów i masowością ich występowania. O znaleziskach tych przyjęło się mówić „ogrody Ediacary” – ale ta piękna nazwa ma niewiele wspólnego z rzeczywistością. Były to przecież cmentarzyska powstałe w środowiskach, w których warunki okazały się nie sprzyjające życiu. Wyniki najnowszych badań znalezisk z Zimnich Gor świadczą, że dotyczy to zwłaszcza ogrodów Ediacary.

Andriej Iwancow od lat eksploatuje w kłifie białomorskim niezwykle bogatą w skamieniałości ławicę piaszkowca, w której dominują owalne segmentowane organizmy nazwane przezeń *Yorgia* (od rzeczki Jorga, której ujście znajduje się w pobliżu). Warstwa ta okazała się swego rodzaju kamieniem z Rosetty w paleobiologii prekambry. Pokład piaszkowca jest jednorodnej grubości (powstał prawdopodobnie w wyniku opadu pyłu po pustynnej burzy), nie doszło więc do odesktałcenia jego spodniej warstwy. Dzięki temu zachowały się ślady, których nie ma nigdzie na świecie (lub też są bardzo słabo widoczne ze względu na gruboziarnisty osad) – delikatne odciski ciał zwierząt spoczywających na macie sinicowej, widoczne jako wypukłe odciski na dolnej powierzchni piaszkowca. Serie takich pozytywnych odcisków o jednakowych rozmiarach kończą się zwykle



ODCISK CIAŁA *DICKINSONIA*, wendyjskiego (około 555 mln lat) zwierzęcia z piaszkowców Zimnich Gor w północnej Rosji (zdjęcie z prawej). Obok odtworzenie sposobu powstania skamieniałości ukazującej szczegóły jego budowy wewnętrznej (widok od dolnej strony ławicy piasku).



SOCZEWKA PIASKOWCOWA warstwy z *Kimberella* z Zimnich Gor; widoczne są warstwy równoległe do wypukłej dolnej powierzchni oraz przecinające ją rozstępy (wstawka). Na zdjęciu soczewka leży odwrócona o 180°, więc jej dawna dolna powierzchnia znajduje się na górze.

odciskiem negatywowym idealnie do nich pasującym. To kolejne etapy spoczynku zwierzęcia przed jego śmiercią.

W zwykłych warunkach panujących na dnie morskim tego rodzaju zapis agonii nie mógłby przetrwać, gdyż zostałby zatarty przez innych mieszkańców. Szansa na skamienienie pojawia się bowiem tylko wówczas, gdy zwierzę przypadkiem trafi do środowiska zabójczego dla siebie i pozostałych organizmów. Znakomitych świadectw takich „zmań” dostarczają od dawna kamieniołomy jurajskich wapieni litograficznych w okolicach Solnhofen w Bawarii (tam znaleziono szkielety archeopteryksów). To zwykle zapis przebiegu konania morskich stawonogów, których odnóża pozostawiły spiralny trop ze znajdującym się na jego końcu ciałem padłego ostatecznie zwierzęcia.

Sąsiednie warstwy wapieni zawierają nagromadzenia małżów z rodzaju *Solemya*. O jego dzisiejszych przedstawicielach wiadomo, że w ich skrzelach bytują symbiotyczne bakterie, które energię do syntezy związków organicznych uzyskują z utleniania siarkowodoru. Małż penetruje osad cienką palcowatą nogą, uwalniając zawarty w nim H_2S . Piryty, który miał tak istotne znaczenie w powstawaniu skamieniałości ediakarskich, na ogół współwystępuje z siarkowodo-

rem jako produkt bakteryjnego rozkładu szczątków organicznych w warunkach beztlenowych.

Środowisko w Ediacarze, tak jak w jurajskich lagunach Solnhofen, było więc zabójcze dla większości zamieszkujących tam zwierząt. Niektórym jednak, na przykład prekambryjskim „piórom morskim” (*Petalonamae*), wiodło się całkiem dobrze. Dowodem ich związku z matami sinicowymi są występujące pospolicie na całym świecie dyski bazalne ich piórokształtnych ciał, często wnikaające głęboko w osad poniżej maty. W Zimnich Gorach znajduje się je w miejscu, w którym uprzednio żyły, z dyskiem na powierzchni maty i piórem ukośnie tkwiącym wewnątrz piasku, który je przysypał. Argumenty przemawiające za pozostaniem *Petalonamae* zasypianych pyłem wulkanicznym na tym samym miejscu w słynnym, liczącym 560 mln lat, stanowisku Mistaken Point na Nowej Fundlandii przedstawił już przed 20 laty Seilacher.

Zastanawia jednak brak pirytu w ile, niewątpliwie bogatym w związki organiczne, a także w macie sinicowej z Zimnich Gor. Mineral ten występuje tylko przy dolnej powierzchni piaskowca. Najwyraźniej sama obfitość siarkowodoru nie wystarczała do jego wytworzenia – brakowało żelaza. Dostatecznie dużo

związków tego metalu pojawiało się bowiem dopiero wraz z opadami kontynentalnego pyłu eolicznego, z którego okresowo formowały się warstwy piaszczyste osadu.

Potwierdzenia tego scenariusza genezy fauny z Ediacary szukaliśmy w 2001 roku w najbardziej na północ wysuniętej części Syberii, około 200 km na zachód od leżącego nad Morzem Łaptiewów portu Tiksi.

Prekambryjskie pióra morskie

U PODNÓŻA GÓR CZEKANOWSKIEGO rozpościera się równina przecięta kanionami wpadającej do Olenioka rzeki Chorbuisunonki. W jej przełomie położone są najpełniej na kuli ziemskiej odsłonięte warstwy z pogranicza wendu i kambru. Tam właśnie, dzięki pokładowi brekcji wulkanicznej znajdującej się między warstwami zawierającymi skamieniałości, udało się po raz pierwszy datować radiometrycznie początek fanerozoiku – a zarazem ery paleozoicznej i okresu kambryjskiego – na 543 mln lat. To jedyne miejsce na świecie, gdzie skamieniałości ediakarskie występują masowo w wapieniach, a nie w piaskowcach. Zorganizowałem więc wyprawę do tego bezludnego, lecz pięknego zakątka świata.

Wapienie formacji Chatyspyt, w których występują wendyjskie pióra morskie, cuchną ropą naftową. Nasycone są bowiem węglowodorami (bituminami), produktami rozkładu substancji organicznych, będących również naturalnym źródłem siarkowodoru. Potwierdza to hipotezę, że rzeczywiście był on pośrednio źródłem energii dla *Petalonamae*, jak to sugerował Seilacher. Być może przejawem przystosowania do takiego sposobu odżywiania są palcowate wypustki ich dysków bazalnych. W przypadku piór morskich znad Morza Białego i z Ediacary takimi wyrostkami, dość grubymi i krótkimi, opatrzone są tylko niektóre okazy. U *Petalonamae*, zachowanych w bitumicznych wapieniach Chatyspyt, z większości dysków wyrastają gęste pęki cieniutkich wypustek. Trudno się oprzeć wrażeniu, że to analogia służących do uwalniania siarkowodoru palcowatych nóg dzisiejszych małżów (należących do rodzajów *Solemya* i *Lucina*) z chemoautotroficznymi symbiontami w skrzelach.

Oprócz piór morskich nie ma w wendzie Chorbuisunonki innych stworzeń. Jedyne poza Syberią znalezisko prekam-

bryjskiego zwierzęcia w wapieniu to przedstawiciel pokrewnego rodzaju *Paracharnia* z północnych Chin, który miałem okazję zbadać w muzeum w Wuhan. Jego struktury anatomiczne zachowały się dzięki nasokupieniom piryty na ich powierzchni, podobnie jak to się stało w przypadku okazów z Zimnich Gor. To dowód, że nie ma istotnych

końca prekambriu zdarzają się i później, czego przykładem jest choćby wczesnokambryjski *Xenusion*. Dość bliskim odpowiednikiem ediakarskich nawarstwień (zwłaszcza płytkowych wapieni Chatyspyt), w których powstawały odciski miękkich ciał zwierzęcych, są jurajskie wapienie litograficzne Solnhofen. Jednak nigdy później środowiska,

górotwórczych w obrębie ówczesnego kontynentu Syberii.

Nie doszło jednak wtedy do powstania takich warunków, jakie panowały w środowisku Ediacary czy Zimnich Gor. Nie mogły rozwijać się rozległe maty sinicowe. Pojawily się bowiem tam zwierzęta przystosowane – prawdopodobnie dzięki efektywniejszemu układowi

Szansa na skamienienie nienaruszonego ciała pojawia się tylko wówczas, gdy zwierzę przypadkiem trafi do środowiska zabójczego dla siebie i pozostałych organizmów.

różnie w sposobie powstawania skamieniałości ediakarskich w osadach kwarcowych czy wapiennych. Chemiczna natura ziaren osadu nie miała tu więc żadnego znaczenia.

Nad Chorbuseonką ani w położonych poniżej formacji Chatyspyt zdolomityzowanych wapieniach ze stromatolitami (powstałymi z sinic wapiennymi tworami w kształcie kopuł i słupów), ani w występujących wyżej dolomitach, które podobnie jak te ostatnie osadzały się w bardzo płytkim morzu, nie ma węglowodorów. Bitumiczne warstwy zawierające kopalny zapis ogrodów Ediacary formowały się bowiem w sytuacji wyjątkowej – podczas krótkotrwałego epizodu transgresji morza.

Znamienne, że białomorskie pokłady obfitujące w odciski zwierząt również różnią się od warstw leżących niżej i wyżej podobnie jak te ostatnie osadzały się w bardzo płytkim morzu, nie ma węglowodorów. Bitumiczne warstwy zawierające kopalny zapis ogrodów Ediacary formowały się bowiem w sytuacji wyjątkowej – podczas krótkotrwałego epizodu transgresji morza.

Znamienne, że białomorskie pokłady obfitujące w odciski zwierząt również różnią się od warstw leżących niżej i wyżej podobnie jak te ostatnie osadzały się w bardzo płytkim morzu, nie ma węglowodorów. Bitumiczne warstwy zawierające kopalny zapis ogrodów Ediacary formowały się bowiem w sytuacji wyjątkowej – podczas krótkotrwałego epizodu transgresji morza.

w których takie formacje skalne powstawały, nie były równie powszechne. Znikły też żyjące w symbiozie z chemoautotroficznymi bakteriami pióra morskie. Przyczyny tych zmian można częściowo odczytać w urwiskach przełomu Chorbuseonki.

Mit „eksplozji kambryjskiej”

SPLYW CHORBUSEONKĄ dostarcza niezapomnianych przeżyć, o ile nie wieje porwisty wiatr i nie pada śnieg. Łódź ociera się o stromatolitowe kopuły, przysparzające każdego geologa o szybsze bicie serca, podekscytowanego dodatkowo widokiem diamentonośnych kominów kimberlitowych, przebijających pokłady skał kambryjskich. Nad dolomitami, które osadziły się w płytkich wodach końca okresu wendyjskiego, zalegają ilaste i piaszczyste osady. Granicę między nimi uznano za początek kambriu. Tak radykalna zmiana charakteru osadu dennego to przejaw kolejnego globalnego podwyższenia poziomu wód morskich oraz lokalnych procesów

krwionośnemu i barwnikom oddechowym (hemoglobinie i hemocyjaninie) – do życia w mule o obniżonej zawartości tlenu. Spokój panujący uprzednio na dnie został zakłócony, a jego powierzchnia była stale zaburzana (bioturbowana), co nie sprzyjało wzrostowi sinic. Mogły się rozwijać jedynie w środowiskach skrajnych, niedostępnych dla bioturbatorów i roślinożerców. W przełomie Chorbuseonki piaszkowce i ily najwcześniejszego kambriu zawierają liczne ślady pełzania i rycia zwierząt w osadzie, świadczące o naturze ówczesnej bioturbacji [ilustracja poniżej]. Były to m.in. usztywnione słuzem warkoczowate szeregi podłużnych jamek (*Trichophycus*) lub poziome kanały sklepione od góry i z dwudzielną bruzdą u dołu (*Didymaulichnus*), przy czym u niektórych (*Psammeichnites*) sklepienie rozcinane było w trakcie rycia sterczącym pionowo nieznanym narządem stworzenia, które je zrobiło.

Zwierzęta, które pozostawiły te ślady, nie miały mineralnego szkieletu, ustalo-



ŚLADY *PHYCODES PEDUM*, pełzającego po morskim dnie i drążącego osad zwierzęcia, znalezione we wczesnokambryjskich skałach przełomu Chorbuseonki.

no jednak ich przynależność systematyczną na podstawie pewnych swoistych cech. W szwedzkim piaskowcu Mickwitzia Jensen znalazł na końcu walcowatych nerek rozchodzące się promieniście bruzdy. Jeszcze lepiej są one widoczne u późnokambryjskiego potomka *Trichophycus*, występującego masowo w drobnziarnistych piaskowcach Bukówki ko-

foranów, które wchodzą w skład związków chemicznych uczestniczących w przenoszeniu energii w organizmie (np. ATP) czy tworzeniu nośników dziedziczności (resztami fosforanowymi połączone są zasady w DNA). Bakteryjny rozkład substancji organicznej sprzyja zatem uwalnianiu jonów fosforanowych. Zjawisku temu, w powiązaniu ze szcze-

przyczyną zaniku zjawiska fosfatacji drobnych okruczków szkieletowych, podobnie jak wcześniej zanikło środowisko ediakarskie. Sfosfatyzowane skamieniałości typu wczesnokambryjskiego występują jeszcze dość powszechnie w morzach klimatu umiarkowanego w okresie ordowiku, a nawet syluru, w obszarach podwyższonej produkcji

Zachowanie w zapisie kopalnym miękkich tkanek, zawierających niekiedy nawet ślady organelli komórkowych, zawdzięczamy zwykle procesowi ich fosfatacji.

ło Kielc. Taki sposób rycia jest charakterystyczny dla obleniów pokrewnych współczesnym, żyjącym również w Bałtyku, priapulidom (niezmogowcom – Priapulida). Gorzej z określeniem pozycji systematycznej przedstawicieli rodzaju *Psamminchites*. Technika pływania i rycia w osadzie przypominają mięczaki, ale wysuniętego do góry, falującego na boki narządu (oddechowego?) nie miały żadne późniejsze zwierzęta, choć podobne ślady znane są jeszcze z okresu karbońskiego.

Przy całej swej różnorodności wczesnokambryjscy mieszkańcy grząskiego dna mieli podobne zwyczaje: nie zagrzebywali się zbyt głęboko w osadzie. Za wiele było w nim trującego siarkowodoru, a zbyt mało tlenu jak na ich nadal niedoskonałą fizjologię. Głębsze warstwy mułu pozostawały więc dla zwierząt niedostępne.

W jednym z takich specyficznych środowisk, bardzo typowym dla początku kambru, zachodziło niezwykle powolne osadzanie się wapiennego mułu przy obfitości rozkładającej się substancji organicznej. Intensywność życia w oceanach (produkcja biologiczna) ograniczana jest przede wszystkim przez dostępność fos-

foranów, które wchodzą w skład związków chemicznych uczestniczących w przenoszeniu energii w organizmie (np. ATP) czy tworzeniu nośników dziedziczności (resztami fosforanowymi połączone są zasady w DNA). Bakteryjny rozkład substancji organicznej sprzyja zatem uwalnianiu jonów fosforanowych. Zjawisku temu, w powiązaniu ze szcze-

gólnym układem kontynentów i zmianami poziomu wód oceanicznych, zawdzięczamy obfitość drobnych szczątków szkieletowych pokrytych powłokami fosforanu wapnia w wapieniach wczesnego kambru. Rozpuszczenie w kwasie octowym czy mrówkowym każdego kilograma tych wapieni zalegających w przełomie Chorbusuonki bezpośrednio nad piaskowcami daje garść okruczków fosforanowych, z których większość to rurki i muszki kambryjskich zwierząt. Jeśli rozdzielić skamienia, pierwotnie fosforanowe szczątki od wtórnie sfosfatyzowanych skorupki wapiennych, to okazuje się, że ich udział w kambrze i okresach późniejszych nie różnił się istotnie. Przyczyna bogactwa tych pierwszych tkwiła nie w ich biologicznej swoistości, a raczej w warunkach powstawania skamieniałości. Powolne tempo tworzenia się osadu i brak mieszających go organizmów zapewniały wapiennym okruczkom długotrwały kontakt z bogatą w fosforany wodą, co sprzyjało odkładaniu się na nich fosforanowych otoczek. Ekspansja zwierząt dennych do nowych środowisk zmieniła warunki przebiegu procesu fosfatacji i była

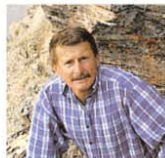
biologicznej (gdzie prądy morskie wyносиły fosforany z głębin oceanicznych). W późniejszych epokach już się ich w zasadzie nie spotyka, wskutek czego w skałach kambryjskich brak pełnej dokumentacji późniejszej ewolucji organizmów w ten sposób skamieniających.

Jednorazowa rzekomo „eksplozja” zwierząt szkieletowych na początku kambru to złudzenie wynikające z nagłej zmiany warunków powstawania skamieniałości (artefakt tafonomiczny). Gdyby na przełomie wendu i kambru fosfatacja zachodziła nieprzerwanie, można byłoby zapewne określić rzeczywistą naturę przemian, a tak skazani jesteśmy na domysły. Bez wątpienia wystąpił wtedy powszechny (ale stopniowy) rozwój zewnętrznych szkieletów mineralnych u różnych grup zwierząt, zapewne głównie w celu ochrony przed coraz liczniejszymi i sprawniejszymi drapieżnikami.

Nie ma też ciągłości zapisu kopalnego ewolucji zwierząt bezszkieletowych. Znamy je jedynie z serii „okien tafonomicznych”, czyli lokalnych środowisk, w których dzięki brakowi bioturbatorów i padlinożerców panowały warunki sprzyjające procesowi fosfatacji. Wiele takich okien znajduje się w formacjach czarnych bitumicznych łupków, często z konkretnymi wapiennymi, z których daje się łatwo wydobywać trójwymiarowo sfosfatyzowane, delikatne szczątki zwierzęce. To właśnie fosfatacji miękkich tkanek, zawierających niekiedy nawet ślady organelli komórkowych, zawdzięczamy zachowanie wczesnokambryjskich zarodków, zidentyfikowanych przez szwedzkiego paleontologa Stefana Bengtsona z Natur Historiska Riksmuseet w Sztokholmie, czy późnokambryjskich larw odkrytych przez Klausa Müllera z Bonn Univer-

O AUTORZE

JERZY DZIK jest paleontologiem, profesorem w Instytucie Paleobiologii Polskiej Akademii Nauk, od 1998 roku członkiem korespondentem PAN. W latach 1991–1996 współredagował międzynarodowy kwartalnik *Acta Palaeontologica Polonica*, a od 1998 roku jest redaktorem serii monograficznej *Palaeontologia Polonica*. W latach 1975–76 był uczestnikiem polskiej wyprawy naukowej do Antarktyki, zaś w 1987 rosyjskiej do Jakucji. Zorganizował także ekspedycje do południowych Chin (w roku 1995) i arktycznej części Syberii (w roku 2001). Zajmuje się wczesną filogenezą bezkręgowców oraz pierwotnych wczesnokambryjskich strunowców i konodontów. Bada również mechanizmy ewolucji organizmów kolonijnych (klonalnych) i najstarszych dinozaurów oraz rozwoju larwalnego mięczaków. W kręgu jego zainteresowań znajduje się także metodologia odtwarzania przebiegu ewolucji na podstawie materiału kopalnego i jej zastosowań w stratigrafii. Jest m.in. autorem książek *Dzieje życia na Ziemi* oraz *Ewolucja życia*.





sität. Najbogatszym i geologicznie najstarszym z takich stanowisk jest Chengjiang w chińskiej prowincji Yunnan.

Kambryjskie miękkie ciała

WIĘKSZOŚĆ SKAMieniaŁOŚCI pochodzących ze sławnych kambryjskich stanowisk (jak kanadyjskie łupki z Burgess czy chińskie z Chengjiang) to szczątki organizmów ze stosunkowo trwałym szkieletem, choć często niezmineralizowanym. Ich powstanie zawdzięczamy zapewne szybkiej fosfatacji, nawet jeśli w wyniku późniejszych przemian fosforanu wapnia w nich nie ma. Istnieją też jednak w Chengjiang przykłady zachowania w zapisie kopalnym ciał zwierzęcych całkowicie pozbawionych szkieletu. Najbardziej spektakularnymi przykładami są tu najstarszy znany strunowiec *Yunnanozoon* [ilustracja powyżej] i żebroław *Maotianoascus*.

Udało mi się określić ich przynależność systematyczną podczas pobytu w pracowni Chen Jun-yuana w Instytucie Geologii i Paleontologii w Nankinie w 1993 roku. *Yunnanozoon* był już opisany; zaklasyfikowano go jako organizm o nieustalonych pokrewieństwach. Przeglądając pod mikroskopem i częściowo preparując liczne okazy tego zwierzęcia, ze zdumieniem zauważyłem, że mimo spłaszczenia (typowego dla łupku – odwodnienie mułu podczas kamienienia kilkadziesiąt razy zmniejsza jego objętość) skamieniałości te są trójwymiarowe. Muł wnikał do wnętrza gardzieli, rozdzielał łuki skrzelowe i znajdujące się po bokach ciała gonady, oraz do jelita. Nigdy jednak nie dotarł do wnętrza segmentowanych bloków (mięśniowych?) i położonej nad jelitem wrzecionowatej struktury o konturach wyraźnie odgraniczonych ciemną linią. Miała ona zatem osłonkę bogatą w substancję organiczną. Było to nic innego jak pierwotny

NAJSTARSZY ZNANY STRUNOWIEC *Yunnanozoon* z wczesnego kambru (około 430 mln lat) ze słynnego z licznych skamieniałości stanowiska Chengjiang w Chinach.

szkielet osiowy, czyli struna grzbietowa zamknięta w kolagenowej błonie podstawnej. Zwarte struktury białkowe miały więc zdolność kamienienia – w tym przypadku zapewne fosfatacji – zarówno w wendzie Namibii (*Ermetia* i inne tamtejsze skamieniałości), jak i w kambrze Chengjiang. Co znamienne, Chen Jun-yuan znalazł później w nowo odkrytym pobliskim stanowisku Haikou okazy *Yunnanozoon* (lub formy bardzo blisko z nim spokrewnionej) z zachowanymi szczegółami układu krwionośnego, nie udało się natomiast wiarygodnie zidentyfikować śladów układu nerwowego ani w tym, ani w innych podobnie zachowanych skamieniałościach pierwotnych kręgowców. Naczynia krwionośne mają bowiem kolagenową podściółkę, której brak komórkom nerwowym, co uniemożliwia ich fosylizację.

W Chengjiang zachowały się nie tylko błona podstawna czy oskórek. Skamieniałość, nazwana później *Maotianoascus*, uważana była do 1993 roku za ukwiała z palczastymi, poprzecznie prążkowanymi czułkami. Gdyby rzeczywiście tak było, osad wnikałby pomiędzy nie od strony osi ciała, a tymczasem dostawał się co najwyżej klinami od zewnątrz. Były

to więc znajdujące się na powierzchni ośmiopromiennej ciała struktury anatomiczne, które pozostawiły przyćmione ślady typowych dla żebroławów narządów grzebykowych. W tym czasie znajdowała się już w druku monografia Simona Conwaya Morrisa z Cambridge University o środkowokambryjskich żebroławach z łupków w Burgess, dokumentująca nieoczekiwaną różnorodność tych zwierząt (u których widać doskonale narządy grzebykowe) w ówczesnych morzach. Mogły zachować się w stanie kopalnym, gdyż w wyniku lokalnego skupienia komórek o złożonych białkowych strukturach ukorzeniających rzęski zawierały dość substancji organicznej, by możliwe były ich mineralizacja i zaciemnienie powierzchni skamieniałości.

Fosylizacji ulegały zatem nie tylko twarde szkielety zwierząt, ale także całkowicie miękkie części ich ciał, choć musiały istnieć szczególnie sprzyjające temu warunki. Jeśli jednak już doszło do powstania skamieniałości, są one obecnie dla paleontologów niezwykle cennym dokumentem ewolucyjnych przemian, jakim podlegały nie tylko same zwierzęta, ale także zamieszkane przez nie środowiska. ■

JEŚLI CHCESZ WIEDZIEĆ WIĘCEJ

- A Possible Early Cambrian Chordate. Jun-yuan Chen, Jerzy Dzik, Gregory D. Edgecombe, Lars Ramsköld i Gui-ying Zhou; *Nature*, tom 377, s. 720-722, 1995.
 Dzieje życia na Ziemi. Wprowadzenie do paleobiologii. Jerzy Dzik, PWN, 1996.
 Ewolucja życia. Tom 8 Wielkiej Encyklopedii Geografii Świata, Wyd. Kurpisz, 1997.
 Organic Membranous Skeleton of the Precambrian Metazoans from Namibia. Jerzy Dzik; *Geology*, tom 27, s. 519-522, 1999.
 An Asymmetric Segmented Organism from the Vendian of Russia and the Status of the Dipleurozoa. Jerzy Dzik i Andrej Y. Ivantsov; *Historical Biology*, tom 13, s. 255-268, 1999.
 Microbial Mats in Terminal Proterozoic Siliciclastics: Ediacaran Death Masks. James G. Gehling; *Palaos*, tom 14, s. 40-57, 1999.
 Possible Ctenophoran Affinities of the Precambrian „Sea-Pen” Rangea. Jerzy Dzik; *Journal of Morphology*, tom 252, s. 315-334, 2002.
 Anatomical Information Content in the Ediacaran Fossils and their Possible Zoological Affinities. Jerzy Dzik; *Integrative and Comparative Biology* (w druku), 2003.