



Fenomen kambryjskich łupków z Burgess w Górach Skalistych (Kanada) – przegląd fauny, środowiska sedymentacji i zjawisk tafonomicznych

Maciej G. Śliwiński¹, Anna Żylińska²



M.G. Śliwiński

A. Żylińska

The Cambrian Burgess Shale phenomenon of the Rocky Mountains (Canada) – an overview of the fauna, sedimentary and taphonomic conditions. *Prz. Geol.* 61: 746–754.

Abstract. The Burgess Shale of the Canadian Rocky Mts is one of the most well-known occurrences of Cambrian strata exhibiting exceptional preservation of a soft-bodied fauna. While Lagerstätten of the Burgess Shale-type fauna have been recognized in almost all parts of the world and in all Cambrian series, the circumstances and mechanisms allowing for such a unique mode of preservation have remained enigmatic. Of particular debate has been the reconstruction of prevailing redox conditions. This brief contribution overviews the fauna and recent advances towards understanding the sedimentary and taphonomic conditions prevailing during deposition.

Keywords: Cambrian, Burgess Shale, Rocky Mountains, Lagerstätten, redox

Kambryjskie łupki z Burgess – jedno z najbardziej znanych stanowisk kopalnej fauny na świecie oraz najistotniejszych okien tafonomicznych³ (*Fossilagerstätte*, *Konservat Lagerstätte*) – zostały odkryte pod koniec sierpnia 1909 r. przez Charlesa Doolittle'a Walcott'a (1850–1927), ówczesnego sekretarza Instytutu Smithsona w Waszyngtonie (USA), w Górach Skalistych w Kanadzie w pobliżu miasta Field w Kolumbii Brytyjskiej. Znaczenie tego stanowiska paleontologicznego podkreślił S. Gould (1989; str. 56) słowami: „Zawierając jedyny istotny zespół fauny o miękkim ciele z tych pradawnych czasów, łupki z Burgess stanowią naszą jedyną perspektywę na początki współczesnego życia w całej jego pełni”.

Jedna z legend dotyczących tego odkrycia mówi, że pod sam koniec sezonu prac terenowych koń Walcott'a potknął się w czasie burzy śnieżnej. Usuwając płyty skalne blokujące ścieżkę, Walcott rozbił jedną z nich, odkrywając spektakularny okaz *Marella* (Briggs i in., 1994). Dalsze prace poszukiwawcze rozpoczęły się jednak dopiero w następnym sezonie, w roku 1910. Do 1924 r. Walcott i jego współpracownicy zgromadzili kolekcję ponad 65 000 okazów wyjątkowych skamieniałości; stanowią one obecnie trzon kolekcji fauny z łupków z Burgess w waszyngtońskim Instytucie Smithsona.

Od czasu tego pierwszego znaleziska na grani Fossil Ridge, rozciągającej się pomiędzy szczytami Mt. Wapta i Mt. Field na wysokości ponad 2000 m n.p.m. (zob. zdjęcie na okładce głównej), powstało wiele kamieniołomów, z których pozyskuje się niezwykle cenne, unikatowo zachowa-

ne skamieniałości. Są to najczęściej szczątki organizmów o wyjątkowym wyglądzie, często reprezentujących nieopisane do tej pory rodzaje i gatunki, bez szkieletu lub ze szkieletem niezmineralizowanym. Pojawienie się w zapisie kopalnym tak niezwykłego zespołu skamieniałości umożliwiło poznanie zasadniczego etapu radiacji adaptatywnej i pierwotnych planów budowy zwierząt wielokomórkowych na przełomie proterozoiku i kambru (= eksplozja kambryjska; czas trwania ~15 Ma, np. Sepkoski, 1978, 1992; Whittington, 1985; Conway Morris, 1989; Butterfield, 2003).

Klasyczne odsłonięcia łupków z Burgess występują w Parku Narodowym Yoho w pobliżu miasta Field w południowo-wschodniej Kolumbii Brytyjskiej (Kanada) (ryc. 1A). Sąsiadujące z nim parki to: Park Narodowy Banff (ryc. 2) oraz Park Narodowy Kootnay. Są one często odwiedzane, podobnie jak Park Narodowy Glacier (ryc. 3), leżący nieco na południe po obu stronach granicy USA/ Kanada. Miasteczko Field jest bazą wypadową dla wycieczek geologicznych do wychodni łupków w kamieniołomie Walcott'a na grani Fossil Ridge oraz na zboczach góry Mt. Stephen (ryc. 4). Wycieczki organizowane są przez Burgess Shale Geoscience Foundation (<http://www.burgess-shale.bc.ca>).

TŁO GEOLOGICZNE I PALEOGEOGRAFICZNE

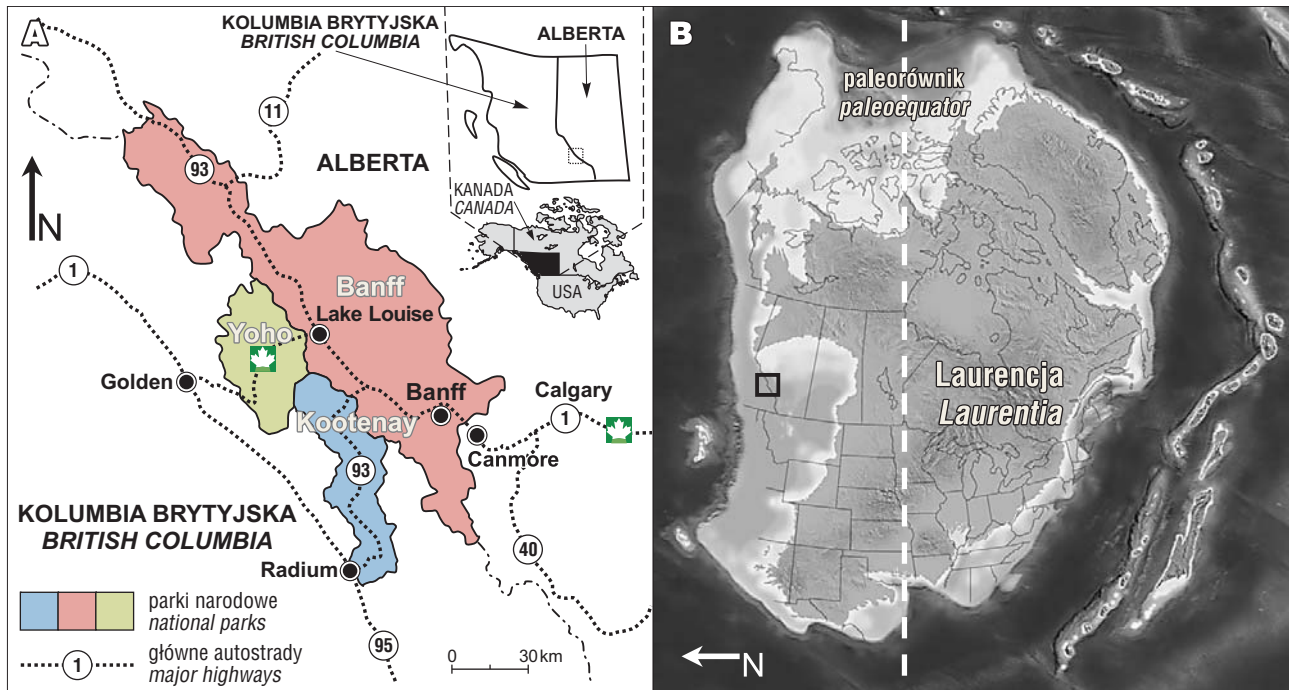
W środkowej części okresu kambryjskiego⁴ obszar dzisiejszej zachodniej Kanady znajdował się w obrębie północnej, pasywnej krawędzi paleokontynentu Laurencja, w strefie równikowej (ryc. 1B). Ten dawny kontynent,

¹ Department of Geoscience, University of Wisconsin-Madison, 1215 W. Dayton St., Madison, WI 53706, USA; msliwinski@wisc.edu.

² Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; anna.zylinska@uw.edu.pl.

³ Okno tafonomiczne (ang. *taphonomic window*): nagromadzenie znakomicie zachowanych szczątków roślin i/lub zwierząt, w tym organizmów bezszkieletowych, których zachowanie w „typowych” warunkach fosylizacji nie byłoby możliwe. Bardzo często *Fossilagerstätte* dają wgląd w zespoły organizmów nieposiadających szkieletu (np. Niedźwiedzki, 2002; Butterfield, 2003).

⁴ Obecnie, okres/system kambryjski dzielony jest na cztery epoki/oddziały; ich nazwy są wciąż w fazie ustalania przez Międzynarodową Podkomisję Stratygrafii Kambru (patrz np. Żylińska, 2008). Według nowego podziału środkowa część okresu kambryjskiego odpowiadałaby trzeciej (jeszcze nie nazwanej) epoce kambru.



Ryc. 1. A – położenie kanadyjskich parków narodowych Yoho, Banff i Kootenay, gdzie znajdują się unikatowe wychodne skały i stanowiska fauny łupków z Burgess. Przerywane linie oraz numery w kółkach oznaczają główne autostrady. **B** – rekonstrukcja paleogeograficzna Laurentcji dla środkowej części kambru (R. Blakey, Northern Arizona University; <http://cpgeosystems.com/paleomaps.html>). Kwadrat wskazuje obecne położenie obszaru A

Fig. 1. A – location of the Canadian Yoho, Banff and Kootenay National Parks that are home to exceptional Burgess Shale-type deposits and fossil sites. Dashed lines and circled numbers denote major highways. **B** – palaeogeographic reconstruction of the Laurentian landmass during mid-Cambrian times (R. Blakey, Northern Arizona University, <http://cpgeosystems.com/paleomaps.html>). Square denotes area depicted in A

obejmujący m.in. znaczną część dzisiejszej Ameryki Północnej, wyodrębnił się z końcem proterozoiku wskutek rozpadu superkontynentu Rodinia (Struik, 1987). Obecność licznych uskoków, związanych z reżimem ekstensyjnym, doprowadziła do powstania znacznych deniwelacji dna morskiego. W ciepłych, dobrze natlenionych wodach morza kambryjskiego rozwinęła się na tym obszarze płytkowodna platforma węglanowa (ryc. 5); jej najbardziej zewnętrzna część charakteryzowała się wyraźną, stromą krawędzią o wysokości względnej do 200 m, zapisującą się w przekroju geologicznym gwałtowną zmianą facjalną (Stewart i in., 1993). W literaturze regionalnej krawędź ta znana jest jako Kicking Horse Rim, zaś skarpa jako Cathedral Escarpment (ryc. 4 i 5). U podnóża platformy węglanowej na podniesieniu przedkontynentalnym w znacznie głębszym środowisku deponowane były osady wapienne, mułowcowe i ilaste (w tym utwory formacji Stephens i łupków z Burgess) (ryc. 6 i 7). Utwory te noszą cechy depozycji w wyniku działalności prądów zawieszinowych przemieszczających luźny lub częściowo skonsolidowany materiał z płytszych środowisk sedymtacji (ryc. 8). Proces redepozycji nie ominął także fauny bytującej w płytkich środowiskach platformy węglanowej. W znacznie późniejszych etapach ewolucji geologicznej tego obszaru, podczas wypiętrzania się Gór Skalistych na przełomie późnej kredy i wczesnego paleogenu, utwory te uległy metamorfizmowi w facji zielenicowej (Powell, 2003); uważa się jednak, że proces ten nie wpłynął zasadniczo na zmianę pierwotnego składu mineralnego samych skamieniałości (Orr i in., 1998; Powell i in., 2003).

ZESPÓŁ ORGANIZMÓW ŁUPKÓW Z BURGESS

Wyjątkowość skamieniałości łupków z Burgess wynika z faktu, że ponad 95% zachowanych w nich szczątków pochodzi od organizmów bezszkieletowych lub takich, których szkielet nie był zmineralizowany (Conway Morris, 1998). Szczątki takich organizmów są całkowicie nieobecne w typowych kambryjskich tafocenozach. Przypuszcza się, że jeśli pierwotnie wchodziły one w skład biocenoz kambryjskich, to ich brak w stanie kopalnym może wynikać z późniejszych procesów tafonomicznych, m.in. rozkładu materii organicznej podczas pogrzebania. Zachowanie organizmów z mineralnym szkieletem wraz z tymi, których tkanki nie ulegały biomineralizacji, daje wyjątkową możliwość poznania struktury kambryjskich zespołów organizmów morskich.

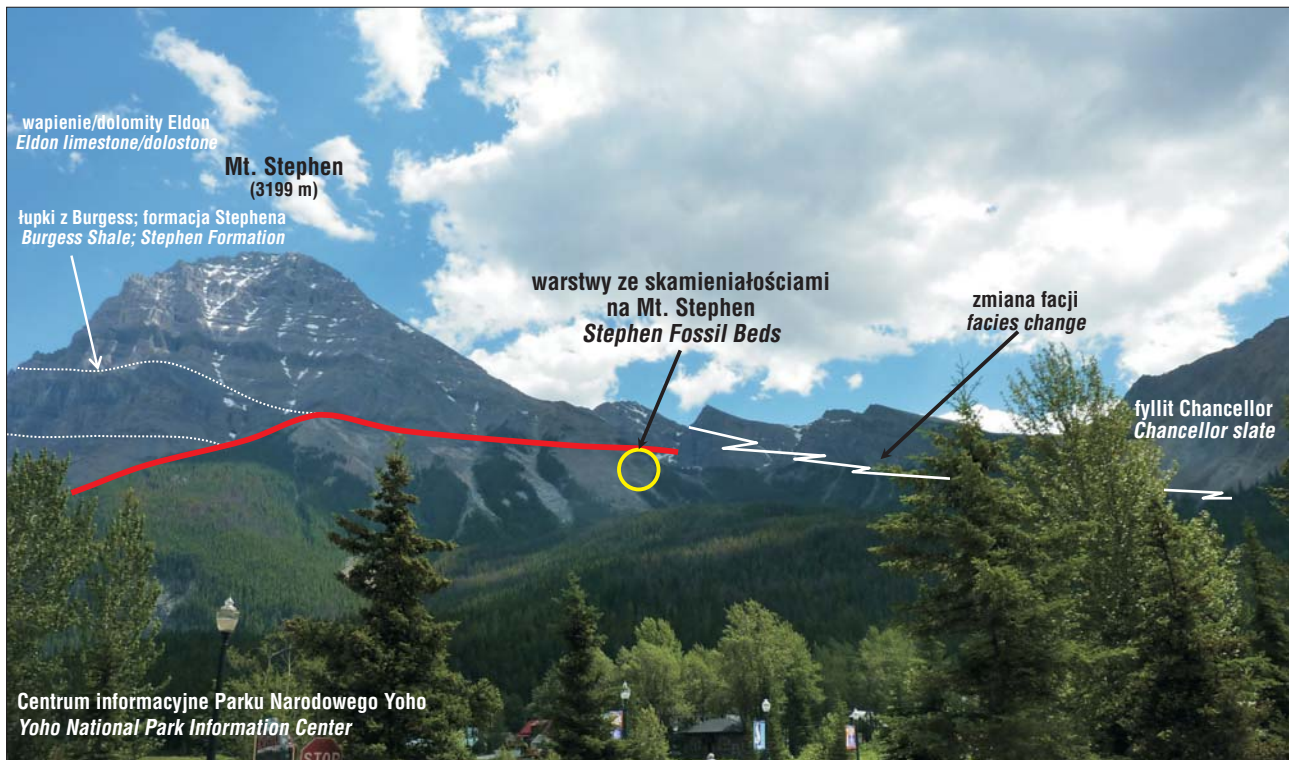
Badania ponad 65 000 okazów zachowanych na ponad 30 000 płytach łupków (Conway Morris, 1986) wykazały, że zespół organizmów łupków z Burgess składał się ze zwierząt bentosowych i pelagicznych (ryc. 9A). Wśród fauny bentosowej wiodącą rolę odgrywały stawonogi (np. *Marella*, *Leancoilia*, *Aysheaia*), przy czym trylobity, dominujące w ogromnej większości stanowisk faun kambryjskich, stanowiły tu zaledwie niewielką część (Whittington, 1985; Conway Morris, 1986) (ryc. 9B–E). Ponadto, skład zespołu uzupełniały niezmogowce (priapulidy; np. *Ottoia*), wieloszczety (np. *Wiwaxia*), parzydełkowce (np. *Cambrorhytium*), gąbki (np. *Capsospongia*), mięczaki (np. *Odontogriffus*), szkarłupnie (np. *Eldonia*) oraz wiele grup o niepewnej pozycji systematycznej (Conway Morris &



Ryc. 2. Park Narodowy Banff pod koniec sierpnia, zachodnia Alberta, Góry Skaliste (Kanada). Widok z nad Jeziora Moraine w Dolinie Ten Peaks. Odślaniają się tu kwarcyty, wapień oraz dolomity dolnego i środkowego kambru. Wszystkie fot. M.G. Śliwiński
Fig. 2. Banff National Park at the end of August, western Alberta, Canadian Rocky Mountains. View from Moraine Lake in the Valley of Ten Peaks. Exposed here are quartzites, limestones and dolostones of Early and Middle Cambrian age. All photos by M.G. Śliwiński

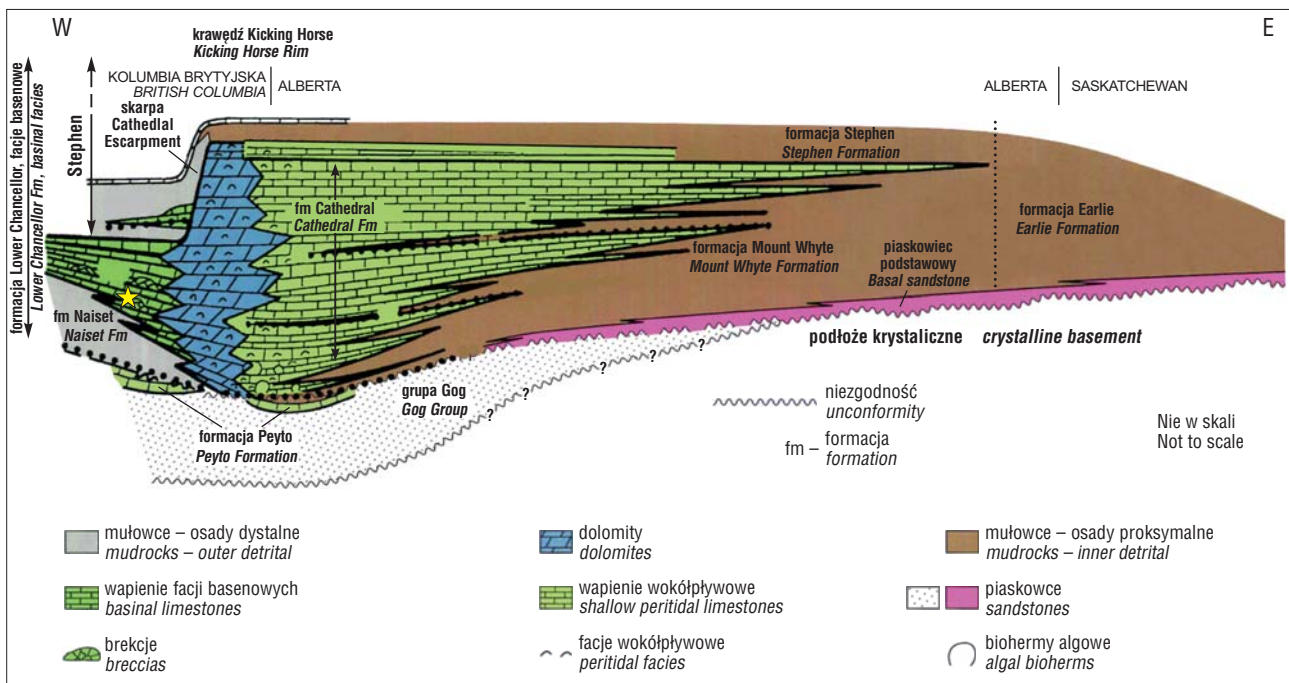


Ryc. 3. Góry Skaliste po drugiej stronie granicy w północno-zachodniej Montanie (USA). Widok z okolicy przełęczy Logan w Parku Narodowym Glacier, leżącym około 500 km na południe od Parku Narodowego Yoho (Alberta, Kanada)
Fig. 3. The Rocky Mountains across the border into NW Montana (US). View from the vicinity of Logan Pass inside Glacier National Park, approximately 500 km south of Yoho National Park (Alberta, Canada)



Ryc. 4. Widok z Centrum Turystycznego w Parku Narodowym Yoho w miejscowości Field, Kanada. Widoczne położenie warstw ze skamieniałościami na Mt. Stephen, które wraz z klasycznym stanowiskiem łupków z Burgess w kamieniołomie Walcotta można odwiedzić za pośrednictwem Burgess Shale Geoscience Foundation

Fig. 4. View from the Yoho National Park Visitor Centre in Field, Canada. Visible from here are the Mt. Stephen Fossil Beds, which, together with the Walcott Quarry Burgess Shale fossil discovery site, can be visited on a tour organized through the Burgess Shale Geoscience Foundation

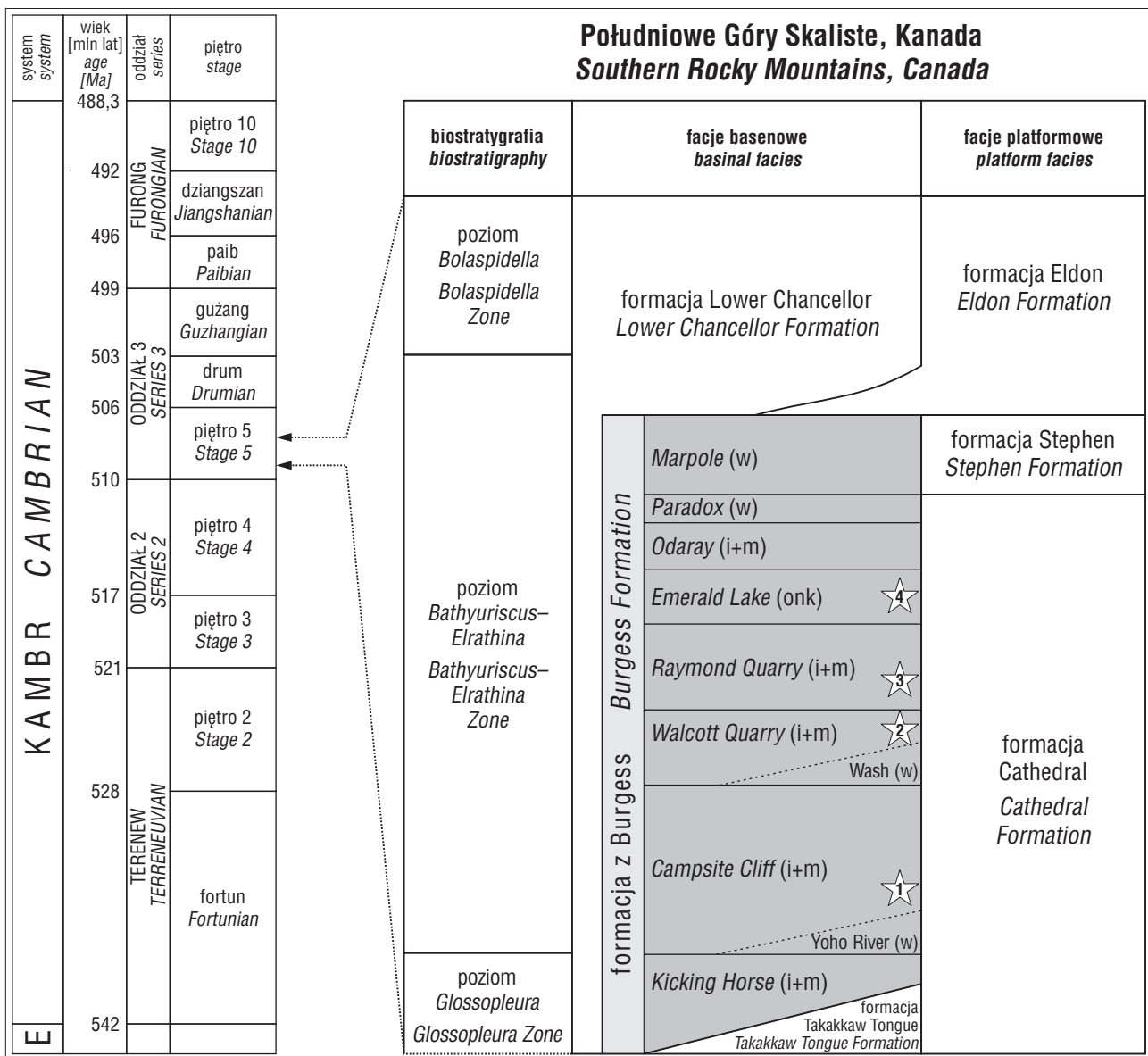


Ryc. 5. Rozmieszczenie jednostek litostratigraficznych (W–E) w utworach kambryjskich zachodniej Kanady. Łupki z Burgess (zaznaczone żółtą gwiazdką) zlokalizowane są u podnóża skarpy Cathedral Escarpment (Aitken, 1989; zmienił)

Fig. 5. Distribution of lithostratigraphic units (W–E) in the Cambrian of western Canada. The Burgess Shale (marked by the yellow star) is located at the base of the Cathedral Escarpment (Aitken, 1989; modified)

Whittington, 1985; Whittington, 1985; Caron & Jackson, 2008). Pod względem liczebności ponad 90% zespołu stanowiło zaledwie dziewięć gatunków (Conway Morris, 1990). Fauna pelagiczna wykazywała przystosowanie do planktonicznego lub nektonicznego trybu życia (Conway Morris, 1979), o czym świadczą np. wydutne pętlwy (np. u *Anomalocaris*), opływowe kształty ciał (np. *Pikaia*) lub powszechność galaretowatych tkanek (np. *Eldonia*).

Whittington, 1985; Whittington, 1985; Caron & Jackson, 2008). Pod względem liczebności ponad 90% zespołu stanowiło zaledwie dziewięć gatunków (Conway Morris, 1990). Fauna pelagiczna wykazywała przystosowanie do planktonicznego lub nektonicznego trybu życia (Conway Morris, 1979), o czym świadczą np. wydutne pętlwy (np. u *Anomalocaris*), opływowe kształty ciał (np. *Pikaia*) lub powszechność galaretowatych tkanek (np. *Eldonia*).



Ryc. 6. Pozycja łupków z Burgess na tle schematu lito- i biostratygraficznego dla Południowych Gór Skalistych (Kanada) oraz globalnej chronostratygrafii kambru. Gwiazdkami zaznaczono wystąpienia fauny z Burgess w rejonie Field (1 – warstwy ze skamieniałościami na Mt. Stephen; 2 – kamieniołom Walcotta; 3 – kamieniołom Raymonda; 4 – kamieniołom Upper Ehmaniella). Nazwy ogniw w obrębie formacji z Burgess wypisano kursywą (w – wapień; i+m – ilowce i mułowce; onk – onkolity) (Powell et al., 2003; zmienił; podział chronostratygraficzny według www.stratigraphy.org)

Fig. 6. Position of the Burgess Shales with regards to the litho- and biostratigraphic scheme for the Southern Rocky Mountains (Canada) and global chronostratigraphy of the Cambrian System. Stars indicate the localities with Burgess Shale-type fauna in the vicinity of Field (1 – Mt. Stephen fossil beds; 2 – Walcott Quarry; 3 – Raymond Quarry; 4 – Upper Ehmaniella Quarry). Members within the Burgess Formation are in italics (w – limestone; i+m – shales; onk – oncolites) (Powell et al., 2003; modified; chronostratigraphic scheme after www.stratigraphy.org)

Ewolucyjne znaczenie fauny łupków z Burgess należy rozpatrywać w kontekście wczesnej ewolucji tkankowców. Podczas eksplozji kambryjskiej w stosunkowo krótkim czasie pojawiło się wiele nowych, spektakularnych planów budowy zwierząt dwubocznie symetrycznych (Conway Morris, 2006). Tak wielkie zróżnicowanie zwierząt tkankowych o często dziwnych kształtach stało się podstawą bestsellerowej książki Stephena Jay'a Goulda *Wonderful Life*, przy czym jej autor (Gould, 1989) utrzymywał, że swoim rozmiarem kambryjskie zróżnicowanie organizmów przekracza jakkolwiek późniejszą fanerozoiczną radiację adaptatywną. Z czasem, wraz z coraz lepszym poznaniem faun takich jak ta z łupków z Burgess oraz nowymi metodami badawczymi opartymi na zegarach

molekularnych, pogląd na temat wyjątkowego zróżnicowania tkankowców w kambrze uległ pewnemu złagodzeniu (np. Conway Morris, 1992, 2006; Dzik, 1996). Obecnie przyjmuje się, że tkankowce o coraz bardziej skomplikowanej budowie pojawiały się sukcesywnie w krótkim interwale czasowym, jeszcze w późnym proterozoiku (Budd, 2003).

TAFONOMIA

Skamieniałości łupków z Burgess są zachowane jako silnie spłaszczone, cienkie, srebrzyste, wielowarstwowe łuski przeławiczone cienkimi warstwami osadu, przy czym poszczególne części zachowanego organizmu nie zachowały



Ryc. 7. Kamieniołom Walcotta, formacja łupków z Burgess. Pozyskano stąd ponad 65 000 okazów fauny
Fig. 7. Walcott Quarry, Burgess Shale Formation, from which over 65 000 specimens of Burgess faunal components have been recovered

się w obrębie pojedynczej warstwy łupku, lecz w kilku sąsiadujących ze sobą ławicach (Whittington, 1980). Według Butterfielda (2003) głównym składnikiem poszczególnych łusek jest węgiel pochodzenia organicznego; taki sposób fosylizacji szczątków organicznych został określony jako typ zachowania skamieniałości z łupków z Burgess (*Burgess Shale-type preservation*; Butterfield, 2003). Zachowaniu podlegają w tym przypadku organizmy nie posiadające zmineralizowanego szkieletu lub wręcz bezszkieletowe. Skamieniałe szczątki odzwierciedlają pierwotny zarys organizmów, a spłaszczenie zostało spowodowane szybką degradacją ich tkanek pod wpływem kompaktacji osadu. Elementy ciała najczęściej ulegające fosylizacji w tych warunkach to struktury pozakomórkowe, takie jak oskórki (kutikula), szczecinki czy szczęki (Briggs & Kear, 1993).

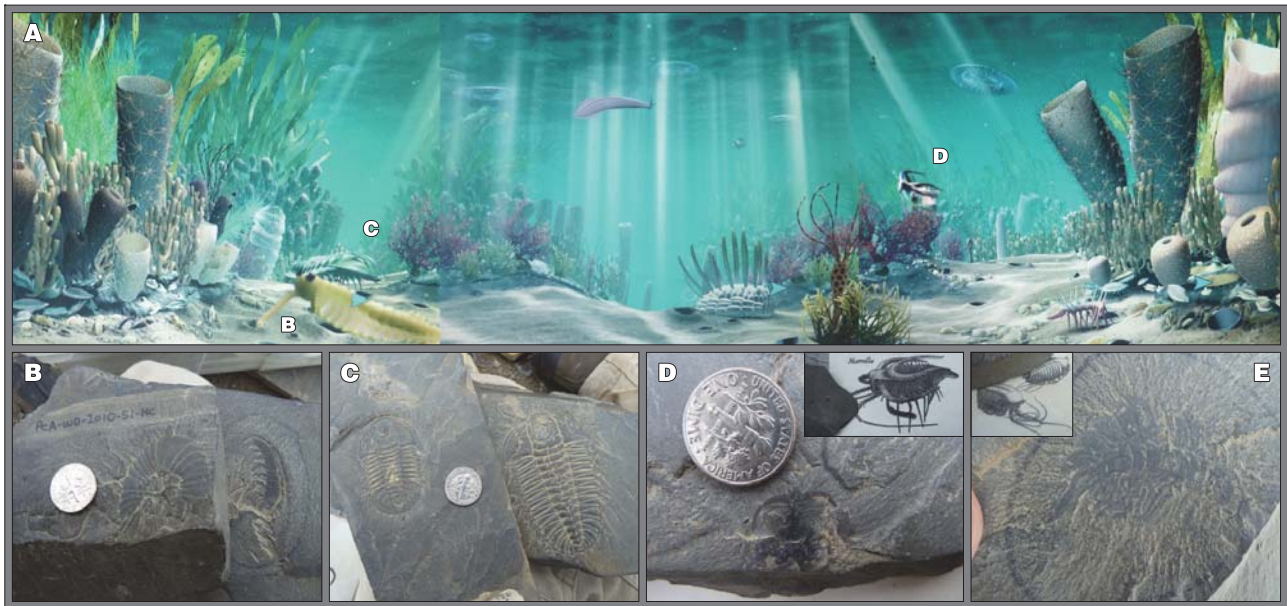
Stanowiska z podobnym sposobem zachowania skamieniałości zostały znalezione w utworach kambryjskich także w innych regionach świata: w Stanach Zjednoczonych (np. formacja Kinzers w południowo-wschodniej Pensylwanii – Powell, 2009; formacje Wheeler i Marjum w zachodniej części Utah – Gaines & Droser, 2010), na Grenlandii (fauna Sirius Passet – Conway Morris i in., 1987) oraz w południowych Chinach (np. fauna Chengjiang – Hou & Sun, 1988; przegląd okien tafonomicznych z kambru Chin – patrz Zhang i in., 2008). Wskazuje to na powszechne występowanie fauny typu łupków z Burgess w kambrze (Conway Morris, 1990). Wystąpienia fauny typu łupków z Burgess znane są również z kambru Polski (Dzik & Lendzion, 1988; Masiak & Żylińska, 1994). Najpóźniejsze jak dotąd wystąpienie fauny tego typu zostało niedawno opisane z dolnego ordowiku Maroka (Van Roy i in., 2010).

Według powszechnie przyjmowanego poglądu, zespół fauny z łupków z Burgess reprezentuje płytkowodne, dobrze natlenione środowisko platformy węglanowej (Conway



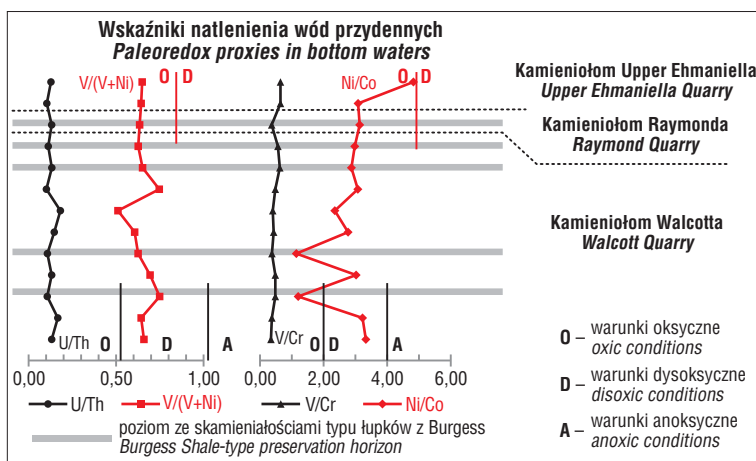
Ryc. 8. Przykłady typów litologicznych prawdopodobnie powstałych w wyniku spływu grawitacyjnego materiału z wyżej leżącego szelfu węglanowego

Fig. 8. Examples of lithologies possibly formed during platform-top derived gravity flows



Ryc. 9. A – rekonstrukcja kambryjskiego dna morskiego pokazującego bogactwo organizmów, których szczątki są znajdowane w łupkach z Burgess (Centrum Turystyczne w Parku Narodowym Yoho, Field, Kanada). B – fragmenty *Anomalocaris*, największego drapieżnika mórz kambryjskich: okrągły aparat gębowy, pierwotnie interpretowany jako meduza *Peytoia* (okaz na lewo) oraz „ramię”, niegdyś interpretowane jako odwłok zwierzęcia podobnego do krewetki (okaz na prawo). C – trylobity *Olenoides serratus*. D – szczątki najbardziej licznych w łupkach z Burgess stawonoga *Marrella splendens*; w prawym górnym rogu rekonstrukcja kompletnego organizmu. E – szczątki stawonoga *Leanochoilia superlata*; w lewym górnym rogu rekonstrukcja dwóch przedstawicieli tego gatunku. Średnica monety w B, C oraz D: ~18 mm

Fig. 9. A – reconstruction of the Cambrian sea bed and its diverse organisms whose compressions are found in the Burgess Shale (Yoho National Park Visitor Center in Field, Canada). B – fragments of *Anomalocaris*, the largest predator of the Cambrian seas: circular jaw apparatus, originally interpreted as the medusoid *Peytoia* (left specimen) and "arm", originally described as the tail of a shrimp-like creature (right specimen). C – trilobites *Olenoides serratus*. D – fossil remains of the most common arthropod of the Burgess Shales – *Marrella splendens*; organism reconstruction shown in upper right corner. E – fossil remains of the arthropod *Leanochoilia superlata*; upper left shows the reconstruction of two representatives of this species. Coin in B, C, and D measures ~18 mm in diameter



Ryc. 10. Wśród czynników wpływających na wyjątkowe zachowanie zespołów typu łupków z Burgess, najczęściej dyskutowanym jest zagadnienie dotyczące warunków redoks w środowisku sedimentacji tych utworów. Rycina pokazuje wskaźniki natlenienia wód przydennych w profilu dla poszczególnych kamieniołomów na grani Fossil Ridge (Powell i in., 2003; zmienione), zinterpretowane przez niektórych badaczy jako wskazujące na przewagę natlenionych wód przydennych podczas sedimentacji łupków z Burgess (zob. jednak dyskusję w tekście, a szczególnie Gaines & Droser, 2010)

Fig. 10. Among the circumstances involved in the exceptional preservation of Burgess Shale-type biotas, reconstructing the prevailing benthic redox conditions of the depositional environment has been the subject of particular debate. Shown here are the up-section trends of benthic water palaeoredox proxies for particular quarries located on Fossil Ridge (Powell et al., 2003; modified), interpreted by some as indicating the predominance of oxic bottom water conditions during deposition of the Burgess Shale (however, see discussion in text, but especially Gaines & Droser, 2010)

Morris, 1986). Powszechnie nieuporządkowane ułożenie skamieniałości w osadach sugeruje gwałtowny transport i pogrzebanie (Whittington, 1980). Potwierdzają to szczegółowe analizy petrograficzne wskazujące na chaotyczną orientację mikrotekstur minerałów ilastych, interpretowane jako wskaźniki nagłej sedimentacji utworów zawierających faunę z przydennych prądów gęstościowych (Piper, 1972; Gaines i in., 2012, ryc. 12 tamże). W jednej z ostatnich prac Gaines i in. (2012) wykazali, że „utwory typu łupków z Burgess charakteryzują się identycznym sposobem zachowania na całym świecie”. Skamieniałości typu łupków z Burgess znajdują się zawsze w obrębie swoistej mikrofacji, jaką są bardzo drobnoziarniste ławice iłowców (wielkość ziaren < 25 μm), których powierzchnie stropowe są spojone wczesnodia-genetycznymi cementami węglanowymi. Cementy te mogły stanowić barierę uniemożliwiającą wymianę utleniaczy pomiędzy osadem a wodami przydennymi. Ponieważ warunki w środowisku sedimentacji były beztlenowe (dysoksyczne do anoksyicznych), najbardziej typowym sposobem rozkładu materii organicznej była zapewne redukcja siarczanów, z dostawą siarczanów z kolumny wody na drodze dyfuzji. Jednakże, w oparciu o badania składu izotopowego siarki ($\delta^{34}\text{S}$ w piryście), Gaines i in. (2012) wykazali, że cementy węglanowe efektywnie uniemożliwiały wymianę

jonową, spowalniając tym samym typowy proces mikrobiologicznego rozkładu w osadzie poprzez zahamowanie efektywności redukcji siarczanów i zastępując reakcje rozkładu nietrwałego węgla mniej efektywnymi procesami metanogenezy i fermentacji.

WARUNKI GEOCHEMICZNE

Najważniejszym zagadnieniem dyskutowanym w kontekście wyjątkowego zachowania fauny typu łupków z Burgess są warunki redoks, jakie przeważały w środowisku sedymentacji (Gaines & Droser, 2010). Większość interpretacji wskazuje na anoksyczne warunki w trakcie procesu depozycji, podczas których organizmy były transportowane na dno z dobrze natlenionych siedlisk (przegląd w: Gaines & Droser, 2010). Według innych badaczy zespoły faunistyczne typu łupków z Burgess zachowały się *in situ* w warunkach sprzyjających bytowaniu (np. Powell i in., 2003; Powell, 2009).

Warunki natlenienia wód dennych podczas depozycji łupków z Burgess próbowano określić korzystając z różnych metod badawczych, w tym analiz paleoichnologicznych (zob. Boyer & Droser, 2009), morfologii i rozmieszczenia pirytu, a także analiz geochemicznych pierwiastków wrażliwych na zmiany potencjału redoks w środowisku sedymentacji (np. Mo, V, U oraz stosunków V/Cr, Ni/Co, Ni/Co, V/(V + Ni), V/Sc; zob. np. Powell i in., 2003). Według Powella i in. (2003) wartości tych wskaźników świadczą o dobrym natlenieniu wód przydennych podczas sedymentacji, jedynie dolna część jednego z czterech badanych profili zawiera zapis warunków dysoksydacyjnych, lecz jest uboga w skamieniałości (ryc. 10; zob. także Powell, 2009). Autorzy ci doszli więc do wniosku, że warunki dysoksydacyjne w wodach przydennych nie były czynnikiem decydującym o unikatowym charakterze zachowania skamieniałości z Burgess i zaproponowali model egzaerobiczny (*sensu* Savrda & Bottjer, 1987). Proces sedymentacji miał zachodzić w dobrze natlenionych wodach przydennych, natomiast tuż przy granicy woda/osad warunki tlenowe ulegały gwałtownemu pogorszeniu, wykluczając kolonizację osadu dennego przez infaunę, co było przyczyną zachowania pierwotnej laminacji osadu (ryc. 7). Maty mikrobialne mogły stabilizować i uszczelniać granicę między dwoma ośrodkami (woda/osad), ograniczając wymianę toksycznych, beztlenowych wód porowych z utlenionymi wodami przydennymi.

Jednakże, według najnowszego przeglądu danych dotyczącego warunków redoks panujących w trakcie sedymentacji łupków z Burgess (Gaines & Droser, 2010), analiza mikrostratygraficzna i ichnologiczna wybranego siedmiometrowego profilu łupków z Burgess z licznymi skamieniałościami (Gostlin, 2006) nie potwierdziła istnienia mat mikrobialnych. Według tych danych, nie można uznawać zespołu fauny z łupków z Burgess jako autochtoniczny, gdyż najlepiej zachowane skamieniałości występują wewnątrz ławic, a nie na ich powierzchniach. Szczegółowe badania w mikroskali utworów typu łupków z Burgess w stanie Utah, USA (formacje Wheeler i Marjum) wykazały, że utwory te są zawsze związane z mikrofacjami wskazującymi na anoksję, przy czym w trakcie sedymentacji poziom tlenu mógł oscylować, co wykazano na podstawie szczegółowych danych dotyczących skamieniałości śladowych w utworach tego typu (Gaines & Droser, 2010).

WARUNKI POWSTANIA OKNA TAFONOMICZNEGO ŁUPKÓW Z BURGESS

Środowisko sedymentacji u podnóża Cathedral Escarpment, o szacowanej głębokości co najmniej 100 m, mogło sprzyjać rozwojowi organizmów bentosowych, żerujących głównie na matach glonowych pokrywających dno morskie. Nagromadzenia fauny powstawały okresowo podczas spływów podmorskich. Po krótkim transporcie w dół ku głębszej strefie wód anoksycznych, osady spływów podmorskich nieomal natychmiast grzebały organizmy bentosowe i nektoniczne żyjące u podnóża skarpy, a także przedstawiciele fauny przetransportowanych z wyżej leżącego szelfu. Nagłe pogrzebanie organizmów poniżej poziomu minimum tlenowego oraz często przywoływana nieobecność bioturbacji w sposób istotny przyczyniły się do powstania unikatowych warunków tafonomicznych, które pozwalały na nietypową fosylizację, np. poprzez wczesne powstawanie diagenetycznych powłok ilastych szczelnie otaczających pogrzebane szczątki (patrz przegląd w: Butterfield, 2003).

UWAGI KOŃCOWE

Warunki i mechanizm unikatowego zachowania w łupkach z Burgess skamieniałości organizmów o miękkim ciele pozostają niejasne od czasu ich odkrycia przez Charlesa Walcotta w kanadyjskich Górach Skalistych późnym latem 1909 r. Od tego czasu utwory z fauną typu łupków z Burgess stwierdzono niemal we wszystkich oddziałach systemu kambryjskiego w wielu odległych, często paleogeograficznie ze sobą niepowiązanych, regionach świata, co podkreśla powszechność tych organizmów w morzach wczesnego paleozoiku. Najnowsze badania Gainesa i in. (2012) podkreślają, że we wszystkich znanych utworach typu łupków z Burgess sposób zachowania skamieniałości jest identyczny. Ponadto, wyjątkowe właściwości chemiczne wczesnopaleozoicznych wód oceanicznych, m.in. wysoka alkaliczność i niska zawartość siarczanów, przyczyniły się do powstawania kambryjskich okien tafonomicznych, wpływając na diagenezę osadu podczas pierwszych tygodni po pogrzebaniu szczątków organicznych, gdy tkanki miękkie zwykle ulegają biodegradacji przez organizmy mikrobialne (Gaines i in., 2012).

Serdecznie dziękujemy Jackowi Grabowskiemu, byłemu redaktorowi naczelnemu Przeglądu Geologicznego, za jego cenne uwagi i pomoc w redakcji tekstu. Pragniemy także podziękować Recenzentom – Marcinowi Machalskiemu oraz Michałowi Zatonowi – za wnikiwe i konstruktywne uwagi do manuskryptu.

LITERATURA

- AITKEN J.D. 1989 – Birth, growth and death of the Middle Cambrian Cathedral carbonate lithosome, Southern Rocky Mountains. *Bull. Can. Petrol. Geol.*, 37: 316–333.
- BOYER D.L. & DROSER M.L. 2009 – Palaeoecological patterns within the dysaerobic biofacies: Examples from Devonian black shales of New York state. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 276: 206–216.
- BRIGGS D.E.G., ERWIN D.H. & COLLIER F.J. 1994 – The Fossils of the Burgess Shale. Smithsonian Institution Press, Washington and London: 1–238.
- BRIGGS D.E.G. & KEAR A.J. 1993 Decay and preservation of polychaetes: taphonomic thresholds in soft-bodied organisms. *Paleobiology*, 19: 107–135.
- BUDD G.E. 2003 – The Cambrian fossil record and the origin of the phyla. *Integrative Comparative Biology*, 43: 157–165.
- BUTTERFIELD N.J. 2003 – Exceptional fossil preservation and the Cambrian Explosion. *Integrative Comparative Biology*, 43: 166–177.
- CARON J.-B. & JACKSON D.A. 2008 – Paleoeecology of the Greater Phyllopod Bed community, Burgess Shale. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 258: 222–256.

- CONWAY MORRIS S. 1979 – The Burgess Shale (Middle Cambrian) fauna. *Ann. Rev. Ecol. System.*, 10: 327–349.
- CONWAY MORRIS S. 1986 – The community structure of the Middle Cambrian Phyllopod Bed (Burgess Shale). *Palaeontology*, 29: 423–467.
- CONWAY MORRIS S. 1989 – Burgess Shale faunas and the Cambrian explosion. *Science*, 246: 339–346.
- CONWAY MORRIS S. 1990 – Burgess Shale. [W:] Briggs D.E.G. & Crowther P.R. (red.) *Palaeobiology: A Synthesis*. Blackwell Science, Oxford: 270–274.
- CONWAY MORRIS S. 1992 – Burgess Shale-type faunas in the context of the "Cambrian explosion": a review. *J. Geol. Soc.*, London, 149: 631–636.
- CONWAY MORRIS S. 1998 – The Crucible of Creation. The Burgess Shale and the rise of animals. Oxford University Press, Oxford, New York and Melbourne, s. 242.
- CONWAY MORRIS S. 2006 – Darwin's dilemma: the realities of the Cambrian "explosion". *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 361: 1069–1083.
- CONWAY MORRIS S., PEEL J.S., HIGGINS A.K., SOPER N.J. & DAVIS N.C. 1987 – A Burgess Shale-like fauna from the Lower Cambrian of North Greenland. *Nature*, 326: 181–183.
- CONWAY MORRIS S. & WHITTINGTON H.B. 1985 – Fossils of the Burgess Shale. A national treasure in Yoho National Park, British Columbia. Report of the Geological Survey of Canada, 43: 1–31.
- DZIK J. 1996 – Wczesna filogeneza zwierząt tkankowych w zapisie kopalnym. *Kosmos*, 45: 657–686.
- DZIK J. & LENDZION K. 1988 – The oldest arthropods of the East European Platform. *Lethaia*, 21: 29–38.
- GAINES R.R. & DROSER M.L. 2010 – The paleoredox setting of Burgess Shale-type deposits. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 297: 649–661.
- GAINES R.R., HAMMARLUND E.U., HOU X., QI C., GABBOTT S.E., ZHAO Y., PENG J. & CANFIELD D.E. 2012 – Mechanism for Burgess Shale-type preservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.*, 109 (14): 5180–5184.
- GOSTLIN K. 2006 – Sedimentology and palynology of the Middle Cambrian Burgess Shale. Ph. D. Thesis, Univ. Toronto.
- GOULD S.J. 1989 – Wonderful life: the Burgess Shale and the Nature of History. W.W. Norton & Co, New York, s. 347.
- HOU X. & SUN W. 1988 – Discovery of Chengjiang fauna at Meishucun, Jinning, Yunnan. *Acta Palaeont. Sin.*, 27: 1–12.
- MASIAK M. & ŻYLIŃSKA A. 1994 – Burgess Shale-type fossils in Cambrian sandstones of the Holy Cross Mountains. *Acta Palaeontologica Pol.*, 39: 329–340.
- NIEDŹWIEDZKI R. 2002 – Zespół skamieniałości a biocenoza – reprezentatywność zapisu paleontologicznego. *Prz. Geol.*, 50: 899–904.
- ORR P.J., BRIGGS D.E.G. & KEARNS S.L. 1998 – Cambrian Burgess Shale animals replicated in clay minerals. *Science*, 281: 1173–1175.
- PIPER D.J.W. 1972 – Sediments of the Middle Cambrian Burgess Shale, Canada. *Lethaia*, 5: 169–175.
- POWELL W.G. 2003 – Greenshale-facies metamorphism of the Burgess Shale and its implications for models of fossil formation and preservation. *Can. J. Earth Sci.*, 40: 13–25.
- POWELL W.G. 2009 – Comparison of geochemical and distinctive mineralogical features associated with the Kinzers and Burgess Shale formations and their units. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 277: 127–140.
- POWELL W.G., JOHNSTON P.A. & COLLOM C.J. 2003 – Geochemical evidence for oxygenated bottom waters during deposition of fossiliferous strata of the Burgess Shale Formation. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 201: 249–268.
- SAVRDA C.E. & BOTTJER D.J. 1987 – The exaerobic zone, a new oxygen-deficient marine biofacies. *Nature*, 327: 54–56.
- SEPKOSKI J.J., Jr. 1978 – A kinetic model of Phanerozoic taxonomic diversity I. Analysis of marine orders. *Paleobiology*, 4: 223–251.
- SEPKOSKI J.J., Jr. 1992 – Proterozoic – early Cambrian diversification of metazoans and metaphytes. [W:] Schopf J.W. & Klein C. (red.), *The Proterozoic Biosphere: A multidisciplinary study*. Cambridge University Press: 553–565.
- STEWART W.D., DIXON O.A. & RUST B.R. 1993 – Middle Cambrian carbonate-platform collapse, southeastern Canadian Rocky Mountains. *Geology*, 21: 687–690.
- STRUICK L.C. 1987 – The ancient western North American margin: an Alpine rift model for the east-central Canadian Cordillera. *Geol. Surv. Can. Paper*, 87 (15): 1–19.
- VAN ROY P., ORR P.J., BOTTING J.P., MUIR L.A., VINTHER J., LEFEBVRE B., EL HARIRI K. & BRIGGS D.E.G. 2010 – Ordovician faunas of Burgess Shale type. *Nature*, 465: 215–218.
- WHITTINGTON H.B. 1980 – The significance of the fauna of the Burgess Shale, Middle Cambrian, British Columbia. *Proceedings of the Geological Association*, 91: 127–148.
- WHITTINGTON H.B. 1985 – The Burgess Shale. Yale University Press, New Haven, s. 151.
- ZHANG X.L., WEI L. & ZHAO Y.L. 2008 – Cambrian Burgess Shale-type Lagerstätten in South China: Distribution and significance. *Gondwana Research*, 14: 255–262.
- ŻYLIŃSKA A. 2008 – Standard chronostratygraficzny kambru – przegląd ostatnich działań Międzynarodowej Podkomisji Stratygrafii Kambru. *Prz. Geol.*, 56: 144–149.

Praca wpłynęła do redakcji 20.05.2013 r.
Akceptowano do druku 20.09.2013 r.

PRZEGLĄD GEOLOGICZNY



Cena 12,60 zł (w tym 5% VAT)

TOM 61 Nr 12 (GRUDZIEŃ) 2013

Indeks 370908 ISSN-0033-2151

**Paleośrodowisko
łupków z Burgess**

Procesy brzegowe rzek

**Endogeniczny pożar składowiska
odpadów komunalnych**

Zdjęcie na okładce: Miejsce odkrycia stanowiska ze słynną fauną łupków z Burgess (kambr środkowy) w Kanadyjskich Górach Skalistych w Parku Narodowym Yoho w pobliżu miejscowości Field, zachodnia Kanada. Widok z kamieniołomu Walcotta na grani Fossil Ridge (w oddali szczyt Mt. Wapta) (zob. Śliwiński & Żylińska, str. 746). Fot. M.G. Śliwiński

Cover photo: View from the discovery site of the Burgess Shale Lagerstätten (Middle Cambrian) in the Canadian Rocky Mountains in Yoho National Park near the town of Field, western Canada. View from Walcott Quarry on Fossil Ridge (Mt. Wapta in the background) (see Śliwiński & Żylińska, p. 746). Photo by M.G. Śliwiński