

## Porównanie podatności magnetycznej (MS) i wskaźników geochemicznych środkowego i górnego franu w Kanadyjskich Górach Skalistych: implikacje dla analiz paleoklimatycznych i paleośrodowiskowych oraz interpretacji zdarzenia *punctata*

Maciej G. Śliwiński<sup>1</sup>, Michael T. Whalen<sup>1</sup>, Jed Day<sup>2</sup>



M. Śliwiński



M. Whalen



J. Day

**Comparison of magnetic susceptibility (MS) and other geochemical proxies from the Middle-Late Frasnian of the Canadian Rocky Mountains: implications for paleoenvironmental and paleoclimatic analyses and interpretations of the *punctata* Event.** *Prz. Geol.*, 58: 1152–1160.

*A b s t r a c t.* Ongoing magnetostratigraphic and geochemical studies (including major and trace element geochemistry and stable isotopes of C, N, O) in the Canadian Rocky Mountains are providing insight into the paleoenvironmental changes of the mid-Frasnian *punctata* Event, a prominent marine geochemical perturbation. The data is evaluated with 1) a regional sequence

stratigraphic perspective and 2) within the context of a rapidly changing Late Devonian world, characterized by numerous sedimentological and faunal perturbations leading up to the eventual Frasnian-Fammanian (F/F) mass extinction. Proxies for bottom water paleoredox conditions (Mo, V, U), oceanic primary productivity ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ,  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ , Cu, Ni, Ba), changes in detrital input (Si, Al, K, Ti, Zr), and magnetic susceptibility display similar trends, indicating that these proxies and MS variations are inherently linked. The observed excursions suggest that changes in detrital input were the main driver of a bioproductivity increase. Elevated organic matter export from the photic zone likely led to the deposition and later preservation of organic-carbon rich facies under facilitated conditions of bottom water suboxia-anoxia. These geochemical trends were likely influenced by eustatic sea level change, but may have been enhanced by pulses of coincident orogenic activity and pulses of terrestrial afforestation. The rise and expansion of the first true forests is thought to have drastically altered nutrient fluxes to the oceans via increases in pedogenesis and the expansion of a mature soil profile. Our work is intended to complement the growing body of research aimed at elucidating the causes and understanding the effects of terrestrial and marine events of the P. *punctata* biozone and, more broadly, at understanding the Earth-system changes of the Late Devonian leading up to the F/F boundary.

**Keywords:** Late Devonian, magnetic susceptibility, *punctata* Event, trace elements, geochemical excursion, stable isotopes, Western Canada Sedimentary Basin

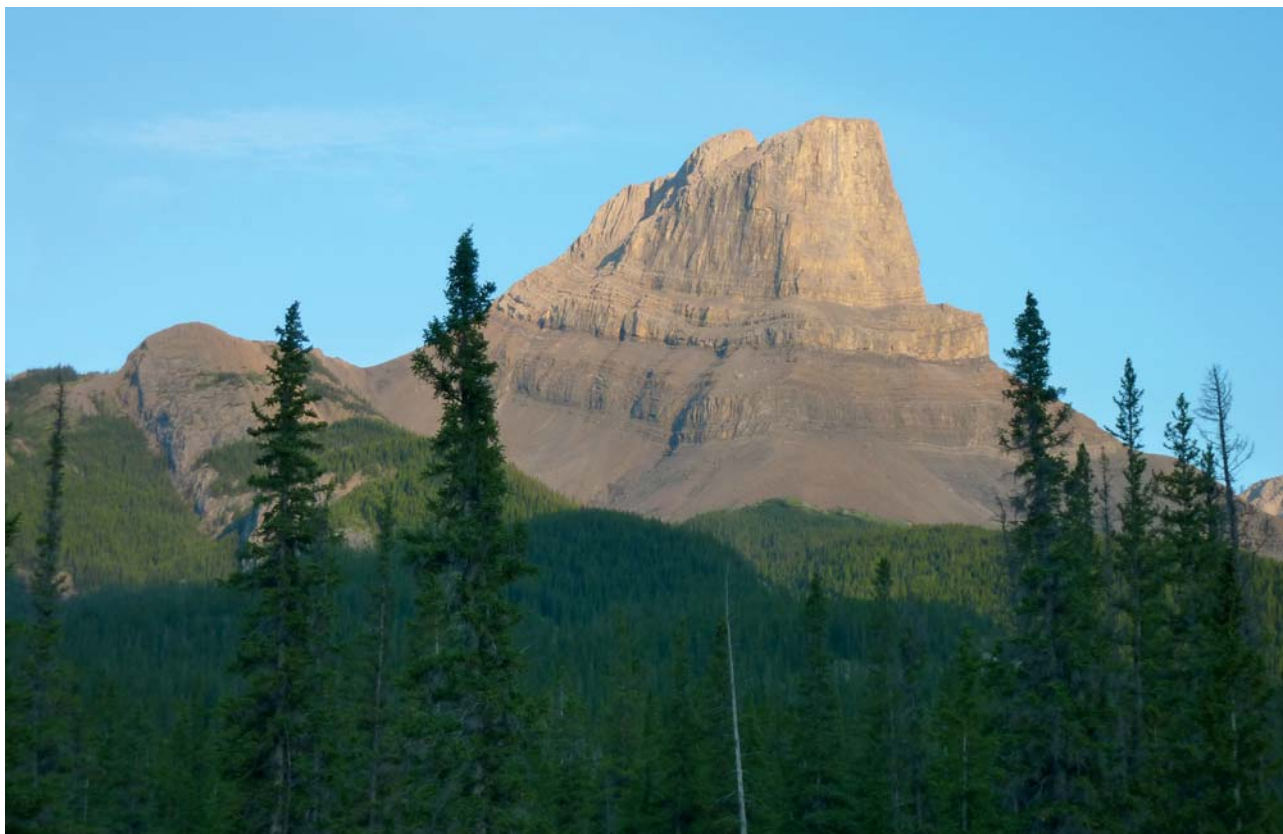
Badania prowadzone przez autorów w Kanadyjskich Górach Skalistych (dewoński basen sedymentacyjny zachodniej Kanady) (ryc. 1–4) obejmują korelację magnetostratygaficzną i analizy geochemiczne, w tym oznaczenie zawartości pierwiastków głównych, pobocznych i śladowych, zawartości węgla organicznego (TOC – *total organic carbon*) oraz stosunków izotopowych  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ ,  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ . Celem badań jest m.in. lepsze rozpoznanie charakteru zmian środowiskowych, jakie zaszły na przełomie środkowego i późnego franu, podczas zdarzenia *punctata* (poziom konodontowy *P. punctata*) reprezentowanego przez zaburzenia geochemii wód oceanicznych. Wyniki są interpretowane w kontekście szybko zmieniającego się świata późnego dewonu, który charakteryzował się wieloma zdarzeniami sedymentologicznymi oraz faunistycznymi, z kulminacją w trakcie wielkiego wymierania na przełomie franu i famenu (F/F). W basenie zachodniej Kanady, jak i w innych lokalizacjach, wymieranie to oznacza koniec rozwoju rozległych platform węglanowych budowanych przez dewońskie Metazoa. Zdarzenie *punctata* było ostatnio interpretowane w kontekście dywersyfikacji oraz ekspansji pierwotnych lasów (Śliwiński i in., 2010).

Późny dewon był epoką gwałtownych i zasadniczych zmian w biosferze lądowej i morskiej (Algeo i in., 1995;

Algeo & Shcekler, 1998; House, 2002; Strel i in., 2000; Racki, 2005; Joachimski i in., 2009). Do dzisiaj rozpoznano co najmniej dwadzieścia krótkotrwałych zdarzeń charakteryzujących się zaburzeniami sedymentologicznymi i faunistycznymi (House, 2002) oraz anomaliami geochemicznymi (Algeo i in., 1995) poprzedzającymi wielkie wymieranie F/F. Wynikiem wielu z nich była depozycja osadów ilasto-wapiennych bogatych w materię organiczną podczas epizodów stagnacji i warunków beztlenowych w wodach dennych (Stoakes, 1980; House, 2002; Sandberg i in., 2002; Rimmer, 2004; Piper & Calvert, 2009). Zauważono, że owe zdarzenia są czasowo blisko powiązane z ewolucyjnymi innowacjami paleobotanicznymi. Szczególnie interesujące dla naszych badań jest szybkie rozprzestrzenienie się lasów archaeopteridowych między środkowym franem a środkowym famenem (Algeo i in., 1995; Algeo & Sheckler, 1998 oraz inni tamże cytowani). Sugerujemy, podobnie jak to zaproponował wcześniej m.in. Racki (Racki, 2005; Racki i in., 2008), że anomalia geochemiczna zaobserwowana w poziomie *punctata* (zdarzenie *punctata* zob. Yans i in., 2007; Racki i in., 2008) może być jednym z początkowych przejawów rozwoju pierwszych prawdziwych lasów. Zdarzenie to charakteryzuje się jedną z największych zmian w stosunkach izotopowych  $\delta^{13}\text{C}$  (sięgającą ok. 6–7‰) (Yans i in., 2007) spośród

<sup>1</sup>Department of Geology and Geophysics, University of Alaska Fairbanks, Fairbanks, AK, 99775, USA; mtwhalen@gi.alaska.edu, mgsliwinski@alaska.edu

<sup>2</sup>Department of Geography-Geology, Illinois State Universtiy, Normal, IL 61790, USA; jeday@ilstu.edu



**Ryc. 1.** Roche Miette (Skala Miette) widziana od strony północnej (Park Narodowy Jasper, zachodnia Alberta, Kanada). W dolnej części występują formacje Perdrix oraz Mount Hawk (facje stokowe i basenowe)

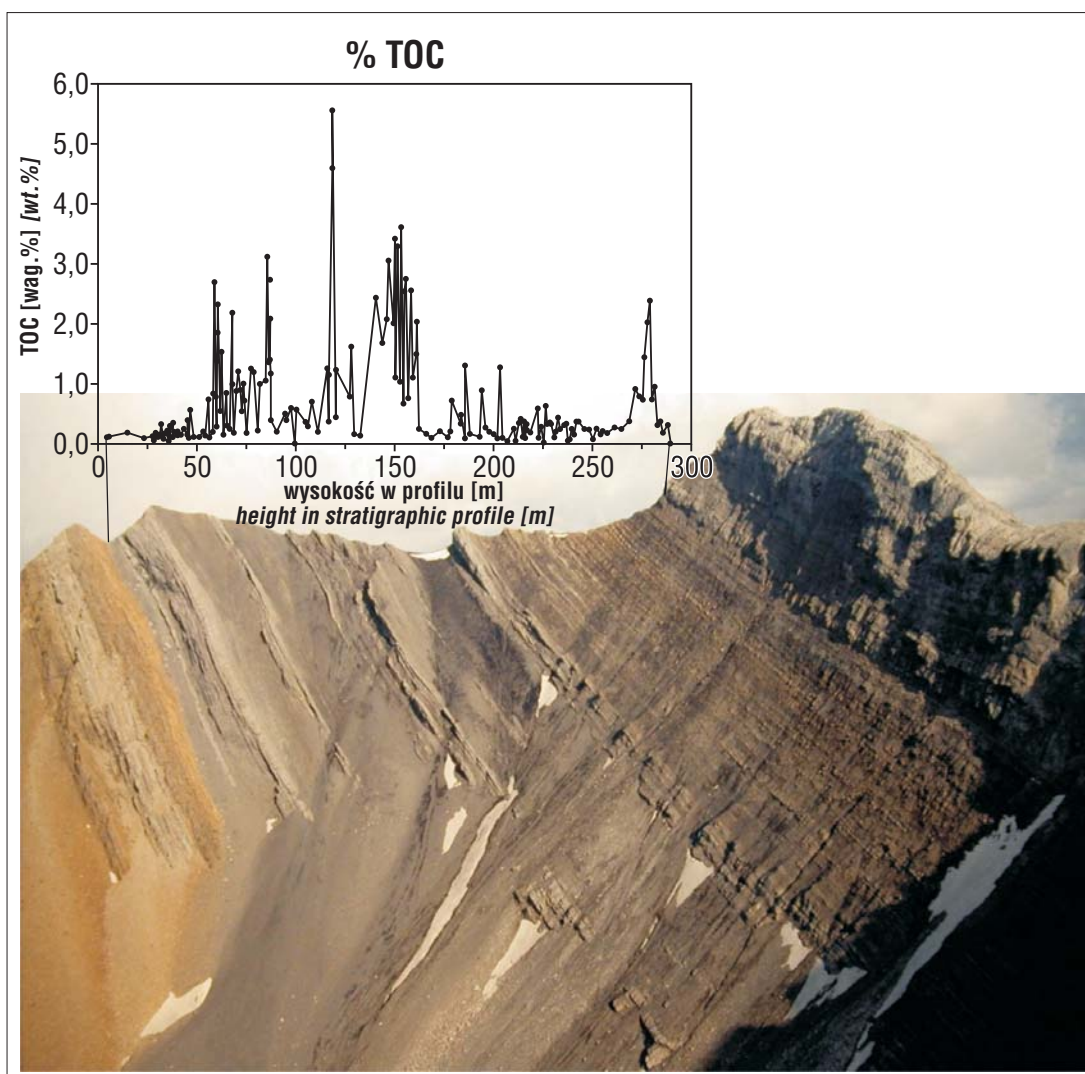
**Fig. 1.** The north face of Roche Miette (Jasper National Park, western Alberta, Canada). At the base are Perdrix and Mount Hawk formations (slope and basinal facies)



**Ryc. 2.** Odślonienie górnodewońskich facji platformowych grupy Fairholme (facje stokowe i basenowe formacji Perdrix i Mount Hawk tu nie występują) oraz facji rampowych formacji Palliser (Park Narodowy Banff, zachodnia Alberta, Kanada). Obie fot. M. Śliwiński

**Fig. 2.** Exposure of the Upper Devonian platform facies of the Fairholme Group (the slope and basinal Perdrix and Mount Hawk formations are not exposed here) and the ramp facies of the Palliser Formation (Banff National Park, western Alberta, Canada). Figs. 1–2 photo by M. Śliwiński





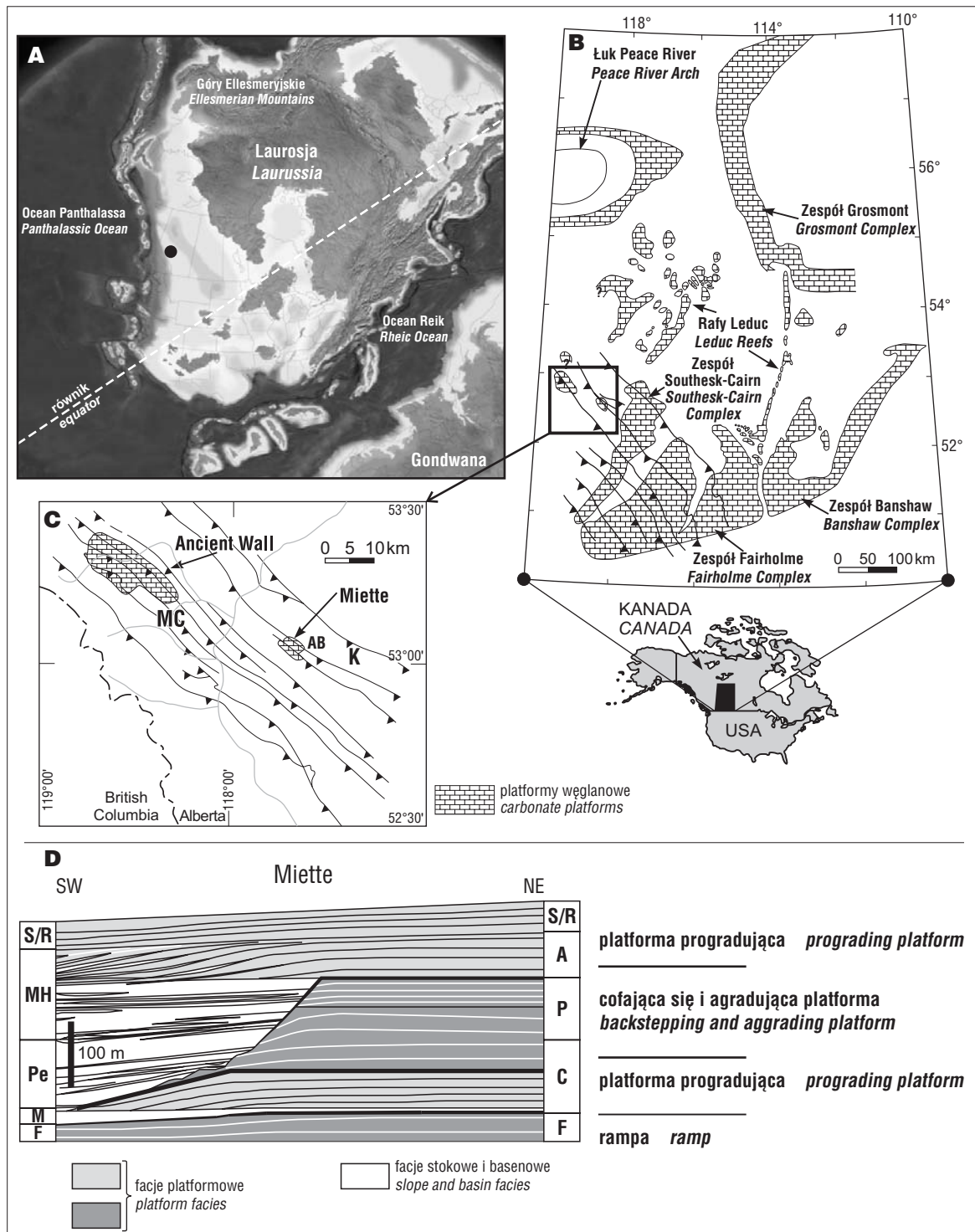
**Ryc. 3.** Zmienność zawartości węgla organicznego (TOC) w górnodewońskich facjach stokowych i basenowych platformy węglanowej Miette (profil K – patrz ryc. 4) (Park Narodowy Jasper, Zachodnia Alberta, Kanadyjskie Góry Skaliste). Osady bogate w materię organiczną między 60 a 75 m profilu reprezentują główne nasilenie produktywności pierwotnej globalnego zdarzenia *punctata*. Fot. M. Whalen

**Fig. 3.** Variations of total organic carbon (TOC) observed in the slope and basinal facies of the Miette carbonate platform (section K – see Fig. 4) throughout the Upper Devonian (Jasper National Park, western Alberta, Canadian Rocky Mountains). The main oceanic bioproductivity increase of the *punctata* Event is represented by the organic-rich strata between 60–75 m in the section. Photo by M. Whalen

dotychczas odkrytych w globalnym zapisie geologicznym fanerozoiku. Specyficzny zapis geochemiczny został stwierdzony m.in. w Ardenach (Belgia), w Górach Świętokrzyskich, na Morawach, w południowych oraz środkowo-zachodnich Chinach, a także w basenie zachodniej Kanady (Holmden i in., 2006; Yans i in., 2007; Ma i in., 2008; Racki i in., 2008 oraz nasze badania). Przyczyny tej anomalii nie zostały jednak przekonująco wyjaśnione. Pisarzowska i in. (2006) oraz Racki i in. (2008) uznali, iż zdarzenie w poziomie *punctata* nie koreluje się z wahaniami globalnego poziomu morza, ani ze zmianami klimatycznymi lub ewolucyjnymi.

Algeo i Scheckler (1998) zaproponowali model łączący zdarzenia lądowe i oceaniczne poprzez ewolucję gleb, które pośredniczą geochemicznie między litosferą, atmosferą a hydrosferą. Między środkowym a późnym dewonem charakter tych oddziaływań prawdopodobnie zmienił się drastycznie w wyniku dywersyfikacji oraz ekspansji geogra-

ficznej głęboko ukorzenionych drzewiastych roślin naczyniowych wykorzystujących nasiona do reprodukcji. Prawdopodobnym rezultatem takiej innowacji ewolucyjnej była przejściowa intensyfikacja pedogenezy oraz rozprzestrzenienie się grubszych i bardziej złożonych pokryw glebowych. Mogło to oznaczać nagłe i radykalne zmiany charakteru procesów wietrzeniowych i względnej dostawy osadów, a zwłaszcza substancji odżywczych, do basenów oceanicznych. Intensyfikacja wietrzenia chemicznego prowadziła do wzrostu produktywności wód morskich, zwiększenia ilości pogrzebanej materii organicznej oraz przyczyniała się do słabszego natlenienia wód dennych. Długotrwałym efektem tego rodzaju procesów jest zmniejszenie poziomu  $\text{CO}_2$  w atmosferze, do którego dochodzi wskutek większego wykorzystywania tego gazu w procesach metabolicznych (na lądzie, a zwłaszcza w oceanosferze), w procesach wietrzenia chemicznego (czego końcowym rezultatem jest uwięzienie  $\text{CO}_2$  w skałach węglanowych), a także



**Ryc. 4.** Obszar badań w kanadyjskich Górach Skalistych zachodniej Alberta: **A** – późnowęglanowa paleogeografia Ameryki Północnej (rekonstrukcja: Ron Blakey, Geology, Northern Arizona University, USA). Kropka wskazuje lokalizację terenu badań; **B** – położenie platform węglanowych w basenie zachodniej Kanady; **C** – powiększony fragment mapki (B) z lokalizacją platform węglanowych Miette oraz Ancient Wall oraz głównych nasunięć; AB – lokalizacja głównego badanego profilu, MC i K – profile dodatkowe (**B** i **C**: Mountjoy, 1965, 1980; Geldsetzer, 1989; Switzer i in., 1994, zmienione); **D** – przekrój facjalny przez platformę Miette. Symbole literowe oznaczają formacje i ogniwa platformowe (patrz ryc. 5): F – Flume, C – Cairn, P – Peechee, A – Arcs, R – Ronde, S – Simla. Odpowiednimi formacjami basenowymi są: M – Maligne, Pe – Perdrix oraz MH – Mount Hawk (**D**: Whalen i in., 2002, zmienione)

**Fig. 4.** Location maps of the study area in the Canadian Rocky Mountains of western Alberta: **A** – Late Devonian paleogeography of North America (reconstruction of Ron Blakey, Geology, Northern Arizona University, USA). Dot indicates the paleolocality of the study area; **B** – location of the carbonate platforms within the Western Canada Sedimentary Basin; **C** – carbonate platforms Miette and Ancient Wall within the thrust belt of western Alberta; AB – denotes the location of stratigraphic section AB, the primary focus of the geochemical work presented herein; MC and K – denote the locations of two other stratigraphic sections (**B** and **C**: Mountjoy, 1965, 1980; Geldsetzer, 1989; Switzer et al., 1994, modified); **D** – cross section through the Miette platform. Key to platform unit abbreviations (see also Fig. 5): F – Flume, C – Cairn, P – Peechee, A – Arcs, R – Ronde, S – Simla. The corresponding slope and basin units are the M – Maligne, Pe – Perdrix and MH – Mt. Hawk (**D**: Whalen et al., 2002, modified)

wskutek pogrzebania materii organicznej w osadach (Kump & Arthur, 1999). Algeo i Sheckler (1998) przedstawili syntezę wcześniejszych prac oraz rozbudowali mechanizmy łączące dewońskie zdarzenia oceaniczne i lądowe, tworząc dynamiczny model, którego hipotetyczne aspekty wymagają potwierdzenia w dalszych badaniach. Mimo wcześniejszych sugestii o związku między rozwojem lasów a obserwowanymi anomaliami geochemicznymi w poziomie *punctata* (John i in., 2008; Racki i in., 2008), wątek ten nie został dotychczas szczegółowo rozwinięty. Zadania tego podjęliśmy się w trakcie naszych badań (Śliwiński i in., 2010). Wykorzystaliśmy pierwiastki śladowe oraz izotopy trwałe (C, N, O) jako wskaźniki zmian paleośrodowiskowych i biologicznych podczas interpretacji zaobserwowanych odchyżeń zawartości wskaźników geochemicznych w kontekście regionalnej stratygrafii sekwencji oraz zmian podatności magnetycznej (MS – *magnetic susceptibility*). Przedstawiając dodatkowe dane oraz inną perspektywę z odległego basenu zachodniej Kanady, pragniemy przyczynić się do interpretacji zapisu zdarzenia *punctata* w Europie, gdzie dotychczas koncentrowała się większość badań.

### Tło geologiczne

Wiek formacji dewońskich występujących w zachodniej Albercie (ryc. 4) oraz wschodniej Kolumbii Brytyjskiej sięga od żywego do famenu. Osady platform węglanowych są podzielone na formacje Flume, Cairn, Southesk oraz Palliser, natomiast w otaczających facjach basenowych wyróżnia się formacje Maligne, Perdrix, Mount

Hawk oraz Sassenach (ryc. 5). Podczas późnego dewonu platformy węglanowe Miette i Ancient Wall (obszar: odpowiednio ok. 165 km<sup>2</sup> i 1200 km<sup>2</sup>, miąższość: 400–500 m.), które są głównymi obiektami badań autorów, były usytuowane w strefie równikowej na zachodnim obrzeżu Laurosji (ryc. 4A). Wchodziły one w skład systemu przybrzeżnych izolowanych platform, który powstał podczas franu na już istniejącej rampie węglanowej. Rampa ta rozwinęła się na powierzchni rozległej regionalnej niezgodności podczas transgresji środkowo- i późnodewońskiej (Mountjoy, 1989). Na wschodzie i na południu, wskutek odcięcia połączeń z oceanem, miała miejsce depozycja ewaporatowa. Przyrost platform nadążał za wzrostem poziomu morza w ramach cyklu drugiego rzędu, natomiast tempo sedymentacji w sąsiednich basenach było niższe (Whalen i in., 2000a, b). Baseny te wypełnione są osadami węglanowymi pochodzenia platformowego z domieszką drobnoziarnistych frakcji klastycznych pochodzących ze strefy orogenu ellesmeryjskiego (Kanadyjski Archipelag Arktyczny) lub też z kontynentu Laurosji (Stoeaks, 1980; Switzer i in., 1994; Whalen & Day, 2008). Typową faunę platform stanowiły gałązkowe, płaskie, gruzłowe i kopolowe stromatoporoidy oraz korale Tabulata i Rugosa. Platformy obrzeżone były biostromami stromatoporoidowymi, natomiast ich zarafowe wnętrza charakteryzowało się występowaniem typowych spłyceń cykli niżejplywowych i perylitoralnych. Rozległa sedymentacja rafowa zakończyła się wraz z wielkim wymieraniem na przełomie franu i famenu, podczas którego wyginęła fauna koralowo-stromatoporoidowa tworząca szkielet konstrukcji rafowych. Rozwój dewońskich platform został podzielony na cztery fazy główne i dziewięć sekwencji depozycyjnych trzeciego rzędu (Whalen i in., 2000a, b; Whalen & Day, 2008).

Woj dewońskich platform został podzielony na cztery fazy główne i dziewięć sekwencji depozycyjnych trzeciego rzędu (Whalen i in., 2000a, b; Whalen & Day, 2008).

### Metody

W naszych badaniach łączymy stratygrafię opartą na podatności magnetycznej (np. ryc. 6), biostratygrafię oraz stratygrafię sekwencji o wysokiej rozdzielczości (por. Whalen i in. 2000a, b; Whalen & Day, 2008; Whalen & Day, 2010) z wynikami badań geochemicznych w celu opisanego i interpretacji rozkładu i wieku późnodewońskich zdarzeń geologicznych i paleobiologicznych. Zastosowanie chemostratygrafii na podstawie pierwiastków głównych, śladowych oraz stosunków izotopowych ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ ,  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ ) pozwoliło, w powiązaniu z wymienionymi metodami korelacji stratygraficznej profili platform Miette i Ancient Wall, na interpretację zmiany paleośrodowiskowej na przełomie franu i famenu (Payne, 2009) oraz w poziomie *punctata* (Śliwiński i in., 2010). Korzystne dla tych badań jest oparcie się na obszernej regionalnej bazie danych MS (Whalen & Day, 2008; Whalen & Day, 2010). Zapis podatności magnetycznej

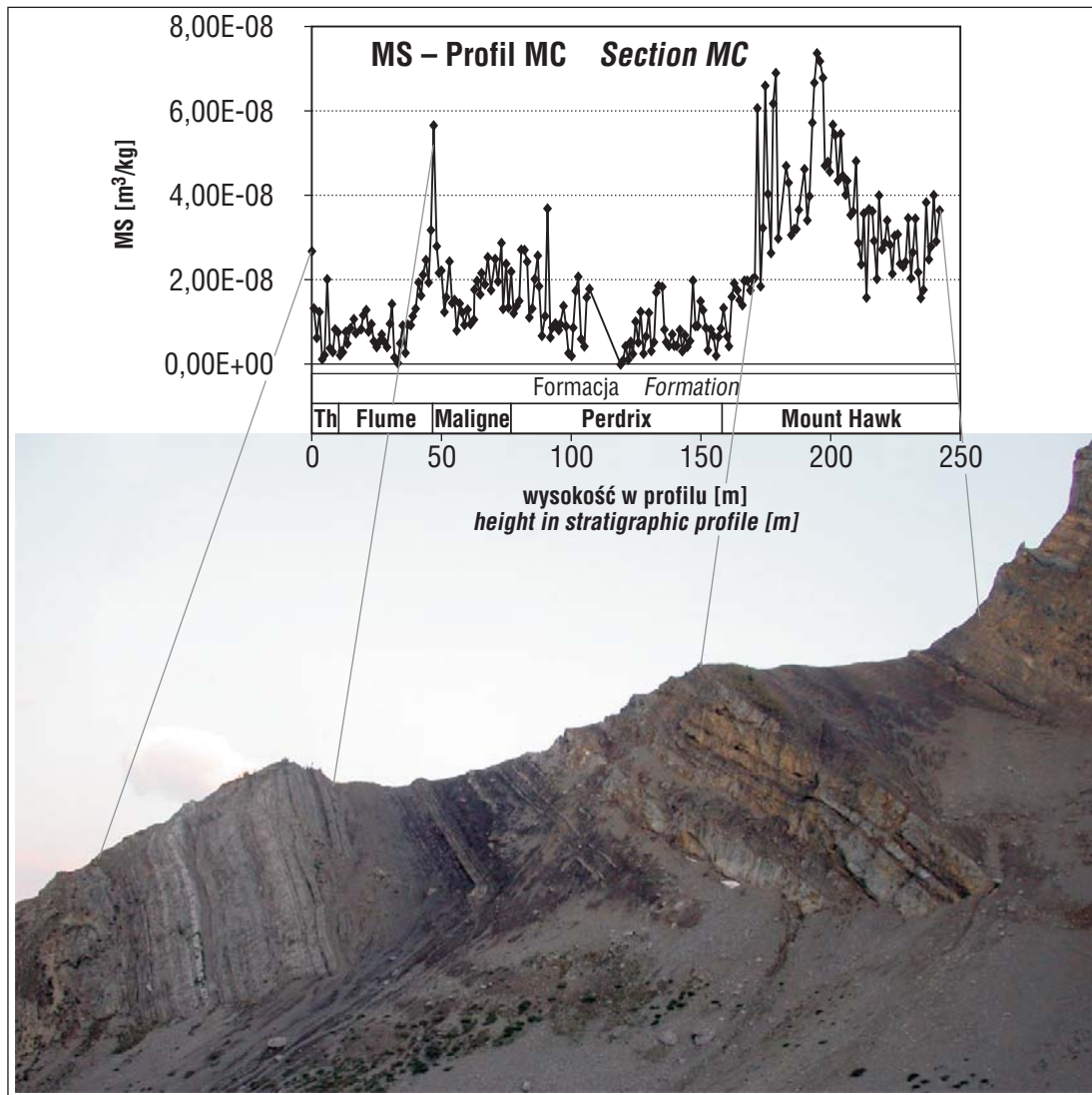
Stratygrafia Stratigraphy		Standardowa zonacja konodontowa Standard conodont zonation	Cykle T-R Cycles	Litostratygrafia Lithostratigraphy			
dewon	późny Late	famien Fam.	<i>triangularis</i>	IIe	Palliser Fm.	Southesk Fm.	
			<i>linguiformis</i>	II d-2	Sassenach Fm.		
		fran Frasnian	<i>rhenana</i>	II d-1	Mount Hawk Fm.		Sijmla/Ronde Mbr.
			<i>jamieae</i>	II c-2	Grotto Mbr.		Arcs Mbr.
			<i>hassi</i>	II c-1	Perdrix Fm.		Peechee Mbr.
			<i>punctata</i>	II b-3?	Cairn Fm.		
	środkowy Middle	żywot Givetian	<i>transitans</i>	II b-2	Maligne Fm.		
			<i>górny Upper</i>	II b-1	Flume Fm.		
		dln. Low.	<i>falsiovalis</i>	II a-2	Thornton Creek Member		
			<i>subterminus</i>	II a-1	kambry Cambrian		
			<i>disparilis</i>				
			Ziegler & Sandberg, 1990	Johnson et al., 1985; Day et al., 1996			

Formation (Fm.) = formacja; Member (Mbr.) = ogniwo

**Ryc. 5.** Litostratygrafia i cykle transgresywno-regresywne (T-R) franu Gór Skalistych w zachodniej Albercie, na tle standardowej zonacji konodontowej (Whalen i in., 2000, zmienione). Wyróżniony graficznie poziom *punctata* zawiera zapis badanego zdarzenia w basenowej formacji Perdrix

**Fig. 5.** Upper Devonian stratigraphy, T-R cycles and standard conodont zonation for the Rocky Mountains of western Alberta, Canada (Whalen et al., 2000, modified). Indicated is the *punctata* biozone, which records the geochemical excursions of the studied event in the basal facies of the Perdrix Formation





**Ryc. 6.** Zdjęcie terenowe i zapis MS badanego profilu MC w Kanadyjskich Górach Skalistych zachodniej Alberty (Park Narodowy Jasper) (Whalen & Day, 2008). Lokalizacja profilu – patrz ryc. 4. Zaznaczono przedziały występowania jednostek litostratygraficznych reprezentujących facje stokowe i basenowe. Fot. M. Whalen

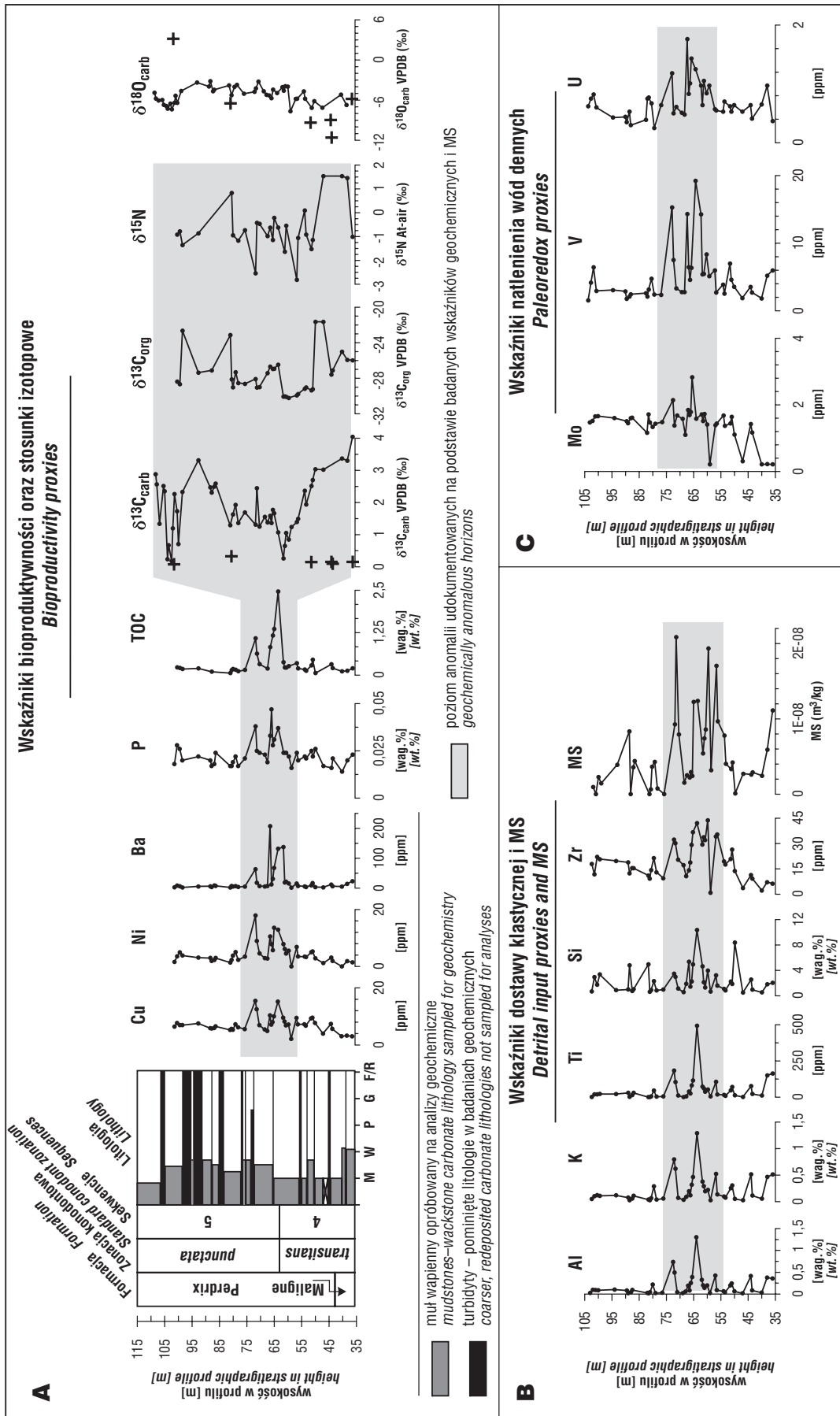
**Fig. 6.** Exposure of Section MC in the Canadian Rocky Mountains of western Alberta (Jasper National Park) (Whalen and Day, 2008). For localization see Fig. 4. Indicated are the field divisions separating slope/basinal lithostratigraphic units. Photo by M. Whalen

skał osadowych jest coraz powszechniej wykorzystywany w celach korelacji stratygraficznej, jako pośredni wskaźnik zmian paleoklimatycznych, oraz do dokładniejszej kalibracji geologicznej skali wiekowej (Ellwood i in., 1999; Weedon i in., 1999; Boulila i in., 2008; da Silva & Boulvain, 2006; Whalen & Day, 2008). Udowodniono, że wahania podatności w profilu korelują się ze zmianami w dostawie materiału klastycznego (Crick i in., 2002; Ellwood i in., 1999; Whalen & Day, 2008). Następstwo zmian MS w różnych profilach dewońskiego basenu zachodniej Kanady jest wyjątkowo zbieżne, co uzasadnia przydatność dla celów korelacyjnych. Wartości MS zależą od odległości środowiska sedymentacji od źródła klastyków, przez co są dodatkową przesłanką przy interpretacji zmian poziomu morza, paleogeografii i paleoceanografii.

#### Wstępne wyniki

Badane odsłonięcia zawierają między innymi niedawno odkryte i dopiero po części opisane anomalie geochemicz-

ne w konodontowym poziomie *Palmatolepis punctata*. Wskazują one na krótkotrwałe zmiany warunków sedymentacji oraz pierwotnej produktywności w oceanie frańskim, sprzyjające między innymi depozycji osadów ilastowapiennych, bogatych w materię organiczną. Odzwierciedleniem takiego przejściowego przyrostu biomasy planktonicznej są anomalnie wysokie zawartości pierwiastków Ni, Cu, Ba oraz P w profilu chemostratygraficznym (Calvert & Pedersen, 1993; Tribovillard i in., 2006) (ryc. 7A). Zaobserwowany został wyjątkowo ciekawy i wyraźnie zgodny zapis badanych wskaźników geochemicznych (ryc. 7). Interpretacja danych na tle regionalnej stratygrafii sekwencji skłania do przypuszczenia że oscylacje geochemiczne miały związek z eustatycznymi zmianami trzeciego rzędu. Zapisy wskaźników zmiennej dostawy materiału klastycznego (Calvert & Pedersen, 1993; Tribovillard i in., 2006), np. Al, K, Ti, Si, Zr (ryc. 7B), są zbieżne ze zmianami podatności magnetycznej, co potwierdza hipotezę o pozytywnej korelacji tych parametrów. Wartości są wyższe podczas niskiego stanu morza (LST – *lowstand systems*



tract) oraz wczesnej transgresji (TST – *transgressive systems tract*), po czym zmniejszają się do poziomu tła stratygraficznego podczas stanu wysokiego (HST – *highstand systems tract*). Oscylacje wskaźników bioproduktywności  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ , Cu, Ni oraz Ba (ryc. 7A) są podobne, co sugeruje, że przyrost biomasy oceanicznej był napędzany dostawą materiału klastycznego, a więc dostawą mikroskładników odżywczych. Podobne wahania wskaźników natlenienia wód dennych (Calvert & Pedersen, 1993; Tribovillard i in., 2006), takich jak U, V, Mo (ryc. 7C), oraz całkowitej zawartości węgla (TOC) (ryc. 7A) również sugerują, że słabe natlenienie przy większej stagnacji środowiska sedymentacji przyczyniało się do uwięzienia w osadach materii organicznej powstałej w warunkach wzmózonej produktywności spowodowanej zwiększoną dostawą klastyczną.

Opublikowane niedawno dane paleoklimatyczne oparte na konodontowych zapisach  $\delta^{18}\text{O}$  (Joachimski i in., 2009) wskazują, że okres od żywetu do wczesnego franu był czasem relatywnie chłodnym. Whalen i Day (2008) porównali wahania MS z Kanady zachodniej z rozpoznanymi globalnymi zmianami  $\delta^{18}\text{O}$  i opisali podobieństwa sugerujące bliskie związki między paleoklimatem, wietrzeniem kontynentalnym, dostawami materiału klastycznego oraz nasiloną bioproduktywnością w oceanie światowym. Poczynając od poziomu *punctata* (a także zdarzenia *punctata*) zaznacza się trend ocieplenia trwający aż do pierwszego pulsu wielkiego wymierania F/F – wcześniejszego (dolnego) zdarzenia Kellwasser (LKE – *Lower Kellwasser Event*). Równoczesny rozwój ewolucyjny roślinności lądowej i gleb oraz wpływ tych procesów na wietrzenie kontynentów i zmiany w dostawach klastycznych są często przywoływane jako czynniki sprawcze owego masowego wymierania (Joachimski & Buggisch, 1993). Zdarzenie *punctata* wydaje się być prekursorem wymierania F/F, jednak bez znacznych zaburzeń świata organicznego (Pisarzowska i in., 2006). Ich brak może się wiązać z wyżej wspomnianym stopniowym trendem paleoklimatycznym. Początek ocieplania w poziomie *punctata* zakończył długotrwałe ochłodzenie środkowodewońskie, natomiast zdarzenie LKE reprezentuje raptowne wahania paleoklimatu po etapie ocieplenia.

### Implikacje i podsumowanie

Whalen i Day (2010) zbadali związek między zmianami poziomu morza trzeciego rzędu a zapisem podatności magnetycznej w basenie zachodniej Kanady. Wysokie wartości MS zostały odnotowane dla późnego etapu stanu wysokiego, stanu niskiego i wczesnego etapu transgresywnego. Na początku transgresji przerobieniu ulega często materiał osadzony podczas stanu niskiego, dlatego facje wczesnej transgresji mogą wykazywać odziedziczone wyższe wartości MS (Whalen i Day, 2010). Chociaż mechanizm ten może być wytłumaczeniem względnego wzrostu MS, dodatkową jego przyczyną mogła być także zwiększona dostawa silikoklastyków podczas stanu niskiego i wczesnej transgresji będąca efektem nasilonego wietrzenia i ewolucji roślinności lądowej w trakcie zdarzenia *punctata*.

Zdarzenie *punctata* może reprezentować puls zmian spowodowany początkiem ekspansji pierwszych prawdziwych lasów. Mogło ono przyspieszyć następujące już wówczas przeobrażenia ekosystemu dewońskiego zwią-

zane m.in. z progresywną kolonizacją środowisk lądowych przez faunę i florę, globalną zmianą od klimatu typu szklarniowego (*greenhouse*) do chłodniowego (*icehouse*), prowadzącą do zlodowacenia pod koniec dewonu (Caputo i in., 2008), oraz fazami orogenicznymi – eowaryscyjskimi i ellesmeryjskimi (Racki, 2005). Perturbacja ta może być postrzegana jako reakcja ekosystemu morskiego na nasilenie wietrzenia chemicznego na lądach oraz większej dostawy materiału klastycznego i substancji odżywczych. Interpretację wzmózonej dostawy terygenów potwierdza zapis MS w zapadlisku Western Canada Sedimentary Basin (Whalen & Day, 2008; Śliwiński i in., 2010). Zmiany MS w poziomie *punctata* zostały udokumentowane w Górach Świętokrzyskich i zinterpretowane, po części, także jako zapis zwiększonego napływu materiału klastycznego na początku doby *punctata* oraz jako wynik wypiętrzenia sąsiednich lądów (Nawrocki i in., 2008) pod koniec tej doby. Epizody górotwórczości, wzmózone wietrzenie oraz zwiększone dostawy substancji odżywczych do oceanów były także uznawane jako czynniki przynajmniej częściowo odpowiedzialne za anoksję oraz anomalie geochemiczne związane ze zdarzeniami na przełomie franu i famenu (Tribovillard i in., 2004).

Obecny stan prac nad globalnym zaburzeniem geochemicznym w poziomie *punctata* oraz nad związanymi z nim zmianami biotycznymi są szczegółowo udokumentowane w publikacjach Rackiego (2008) oraz Balińskiego (2006). Omawiane są tam badania nad stosunkami izotopów  $\delta^{13}\text{C}$  oraz  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , zapisem podatności magnetycznej oraz zmianami geochemicznych pierwiastków śladowych, jako przybliżonych wskaźników wahań produktywności oceanicznej oraz zmian stanu natlenienia wód basenowych. Nasza praca, podobnie jak publikacje Holmdena i in. (2006) oraz Morrowa i in. (2009) stanowi uzupełnienie zapisu uzyskanego do tej pory głównie w Europie (John i in., 2008; Marynowski i in., 2008; Nawrocki i in., 2008, ale patrz także dane z Chin – Ma i in., 2008) z perspektywy odległej Laurosji zachodniej. Jednak dotychczasowe badania geochemiczne udokumentowały globalny charakter zdarzenia jedynie w przypadku anomalii  $\delta^{13}\text{C}$ . Badania geochemiczne nie są jeszcze niestety na tyle wszechstronne by umożliwić porównania basenów, w których dotychczas odnaleziono zapis zdarzenia *punctata*.

Autorzy dziękują za wsparcie finansowe otrzymane od University of Alaska Geophysical Institute, za współpracę z Advanced Instrumentation Laboratory (University of Alaska Fairbanks), oraz za pomoc i cenne wskazówki udzielone przez następujące osoby: Charlotte Schreiber, Rainer Newberry, Ken Severin oraz Jason Addison. Jesteśmy także wdzięczni profesorowi Markowi Narkiewiczowi za recenzję i wygładzenie językowe tekstu.

### Literatura

- ALGEO T.J., BERNER R.A., MAYNARD J.P. & SCHECKLER S.E. 1995 – Late Devonian oceanic anoxic events and biotic crises: „Rooted” in the evolution of vascular land plants? *GSA Today*, 5: 1–66.
- ALGEO T.J. & SCHECKLER S.E. 1998 – Terrestrial-marine teleconnections in the Devonian: links between the evolution of land plants, weathering processes, and marine anoxic events. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.*, 1365: 113–128.
- BALIŃSKI A., OLEMPKA E. & RACKI G. 2006 – Early-Middle Frasnian transition: Biotic response to a major perturbation of the global carbon budget. *Acta Palaeont. Pol.*, 51: 606–608.
- BOULILA S., GALBRUN B., HINNOV L.A. & COLLIN P.Y. 2008 – High-resolution cyclostratigraphic analysis from magnetic susceptibility



- in a Lower Kimmeridgian (Upper Jurassic) marl-limestone succession (La Méouge, Vocontian Basin, France). *Sed. Geol.*, 203: 54–63.
- CALVERT S.E. & PEDERSEN T.F. 1993 – Geochemistry of recent oxic and anoxic marine sediments – implications for the geological record. *Marine Geology*, 113: 67–88.
- CAPUTO M.V., DE MELO J.H.G., STREEL M. & ISBELL J.L. 2008 – Late Devonian and Early Carboniferous glacial records of South America. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, 441: 161–173.
- CRICK R.E., ELLWOOD B.B., FEIST R., HASSANI A.E., SCHINDLER E., DREESEN R., OVER D.J. & GIRARD C. 2002 – Magnetostratigraphy susceptibility of the Frasnian/Famennian boundary. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 181: 67–90.
- DA SILVA A.C. & BOULVAIN F. 2006 – Upper Devonian carbonate platform correlations and sea level variations recorded in magnetic susceptibility. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 240: 373–388.
- ELLWOOD B.B., CRICK R.E., & HASSANI A.E. 1999 – The magneto-susceptibility Event and cyclostratigraphy (MSEC) method used in Geological Correlation of Devonian Rocks from Anti-Atlas Morocco. *Am. Ass. Petrol. Geol. Bull.*, 83: 1119–1134.
- GELDSETZER H.H.J. 1989 – Ancient Wall reef complex, Frasnian age, Alberta. [W:] Geldsetzer H.H.J., James N.P. & Tebbutt G.E. (red.) *Reefs, Canada and Adjacent Areas. Mem. Can. Soc. Pet. Geol.*, 13: 431–439.
- HOLMDEN C., BRAUN W.K., PATTERSON W.P., ENGLINGTON B.M., PROKOPIUK T.C. & WHITTAKER S. 2006 – Carbon isotope chemostratigraphy of Frasnian sequences in Western Canada. *Saskatchewan Geol. Surv., Summary of Investigation*, 1: 1–6.
- HOUSE M.R. 2002 – Strength, timing, setting and cause of mid-Palaeozoic extinctions. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 181: 5–25.
- JOACHIMSKI M.M. & BUGGISCH W. 1993 – Anoxic events in the Late Frasnian – Causes of the Frasnian-Famennian Faunal Crisis? *Geology*, 21: 675–678.
- JOACHIMSKI M.M., BREISIG S., TALENT J.A., MAWSON R., GEREKE M., MORROW J.R., DAY J. & WEDDIGE K. 2009 – Devonian climate and reef evolution: Insights from oxygen isotopes in apatite. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 284: 599–609.
- JOHN E.H., CLIFF R. & WIGNALL P.B. 2008 – A positive trend in seawater  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  values over the Early-Middle Frasnian boundary (Late Devonian) recorded in well-preserved conodont elements from the Holy Cross Mountains, Poland. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 269: 166–175.
- KUMP L.R. & ARTHUR M.A. 1999 – Interpreting carbon-isotope excursions: carbonates and organic matter. *Chem. Geol.*, 161: 181–198.
- MA X.P., WANG C.Y., RACKI G. & RACKA M. 2008 – Facies and geochemistry across the Early-Middle Frasnian transition (Late Devonian) on South China carbonate shelf: Comparison with the Polish reference succession. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 269: 130–151.
- MARYNOWSKI L., FILIPIAK P. & PISARZOWSKA A. 2008 – Organic geochemistry and palynofacies of the Early-Middle Frasnian transition (Late Devonian) of the Holy Cross Mountains, Southern Poland. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 269: 152–165.
- MORROW J.R., SANDBERG C.A., MALKOWSKI K. & JOACHIMSKI M.M. 2009 – Carbon isotope chemostratigraphy and precise dating of middle Frasnian (lower Upper Devonian) Alamo Breccia, Nevada, USA. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 282: 105–118.
- MOUNTJOY E.W. 1965 – Stratigraphy of the Devonian Miette reef complex and associated strata, eastern Jasper National Park, Alberta. *Bull. Geol. Surv. Can.*, 110: 132.
- MOUNTJOY E.W. 1980 – Some questions about the development of Upper Devonian carbonate buildups (reefs) western Canada. *Bull. Can. Pet. Geol.*, 28: 315–344.
- MOUNTJOY E.W. 1989 – Miette Reef Complex (Frasnian), Jasper National Park, Alberta. *Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir* 13: 497–505.
- NAWROCKI J., POLECHOŃSKA O. & WERNER T. 2008 – Magnetic susceptibility and selected geochemical-mineralogical data as proxies for Early to Middle Frasnian (Late Devonian) carbonate depositional settings in the Holy Cross Mountains, southern Poland. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 269: 176–188.
- PAYNE J.H. 2009 – Chemostratigraphy of the Late Devonian Frasnian-Famennian Transition in Alberta, Canada and its implications. *University of Alaska Fairbanks (praca magisterska)*.
- PIPER D.Z. & CALVERT S.E. 2009 – A marine biogeochemical perspective on black shale deposition. *Earth Sci. Rev.* 95: 63–96.
- PISARZOWSKA A., SOBSTEL M. & RACKI G. 2006 – Conodont-based event stratigraphy of the Early-Middle Frasnian transition on South Polish carbonate shelf. *Acta Palaeont. Pol.*, 51: 609–646.
- RACKI G. 2005 – Toward understanding Late Devonian global events: few answers, many questions. [W:] Over D.J., Morrow J.R. & Wignall P.B. (red.) *Understanding Late Devonian and Permian-Triassic biotic and climatic events: Towards an integrated approach. Dev. in Paleont. and Strat.*, 2: 5–36.
- RACKI G., JOACHIMSKI M.M. & MORROW J.R. 2008 – A major perturbation of the global carbon budget in the Early-Middle Frasnian transition (Late Devonian). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 269: 127–129.
- RIMMER S.M. 2004 – Geochemical paleoredox indicators in Devonian-Mississippian black shales, Central Appalachian Basin (USA). *Chem. Geol.*, 206: 373–391.
- SANDBERG C.A., MORROW J.R. & ZIEGLER W. 2002 – Late Devonian sea-level changes, catastrophic events, and mass extinctions. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, 356: 473–487.
- ŚLIWIŃSKI M.G., WHALEN M.T. & DAY J. 2010 – Trace element variations in the Middle Frasnian punctata zone (Late Devonian) in the Western Canada Sedimentary Basin – changes in oceanic bioproductivity and paleoredox spurred by a pulse of terrestrial afforestation? *Geol. Belgica*, 13: 459–482.
- STOAKES F.A. 1980 – Nature and control of shale basin fill and its effect on reef growth and termination: Upper Devonian Duvernay and Ireton Formations of Alberta, Canada. *Bull. Can. Petrol. Geol.*, 28: 345–410.
- STREEL M., CAPUTO M.V., LOVBOZIAK S. & DE MELO J.H.G. 2000 – Late Frasnian-Famennian climates based on palynomorph analyses and the question of the Late Devonian glaciations. *Earth Sci. Rev.*, 52: 121–173.
- SWITZER S.B., HOLLAND W.G., CHRISTIE D.S., GRAF G.C., HEDINGER A.S., MCAULEY R.G., WIERZBICKI R.A. & PACKARD J.J. 1994 – Devonian Woodbend-Winterburn strata of the western Canada sedimentary basin. [W:] Mossop G. & Shetson I. (red.) *Geological Atlas of the Western Canada Sedimentary Basin: Can. Soc. Petrol. Geol. and Alberta Research Council*: 165–202.
- TRIBOVILLARD N., AVERBUCH O., DEVLEESCHOUWER X., RACKI G. & RIBOULLEAU A. 2004 – Deep-water anoxia over the Frasnian-Famennian boundary (La Serre, France): a tectonically induced oceanic anoxic event? *Terra Nova*, 16: 288–295.
- TRIBOVILLARD N., ALGEO T.J., LYONS T. & RIBOULLEAU A. 2006 – Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update. *Chem. Geol.*, 232: 12–32.
- WEEDON G.P., JENKYN H.C., COE A.L. & HESSELBO S.P. 1999 – Astronomical calibration of the Jurassic time-scale from cyclostratigraphy in British mudrock formations. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 357: 1787–1813.
- WHALEN M.T. & DAY J.E. 2008 – Magnetic susceptibility, biostratigraphy, and sequence stratigraphy: insights into Devonian carbonate platform development and basin infilling, western Alberta, Canada. *Soc. Sed. Geol.*, 89: 291–314.
- WHALEN M.T. & DAY J.E. 2010 – Cross-basin variations in magnetic susceptibility influenced by changing sea level, paleogeography, and paleoclimate: Upper Devonian, Western Canada Sedimentary Basin. *Journal of Sedimentary Research*, 80: 1109–1127.
- WHALEN M.T., DAY J., EBERLI G.P. & HOMEWOOD P.W. 2002 – Microbial carbonates as indicators of environmental change and biotic crises in carbonate systems: examples from the Late Devonian, Alberta basin, Canada. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 181: 127–151.
- WHALEN M.T., EBERLI G.P., VAN BUCHEM F.S.P., MOUNTJOY E.W. & HOMEWOOD P.W. 2000a – Bypass margins, basin-restricted wedges and platform-to-basin correlation, Upper Devonian, Canadian Rocky Mountains: implications for sequence stratigraphy of carbonate platform systems. *J. Sed. Res.*, 70: 913–936.
- WHALEN M.T., EBERLI G.P., VAN BUCHEM F.S.P., MOUNTJOY E.W. 2000b – Facies architecture of Upper Devonian carbonate platforms, Rocky Mountains, Canada. [W:] Homewood P.W. & Eberli G.P. (red.) *Genetic stratigraphy on the exploration and production scales – Case studies from the Pennsylvania of the Paradox Basin and the Upper Devonian of Alberta. Bulletin, Centre Recherche Elf Exploration-Production, Mémoire* 24: 139–178.
- YANS J., CORFIELD R.M., RACKI G. & PREAT A. 2007 – Evidence for perturbation of the carbon cycle in the Middle Frasnian punctata Zone (Late Devonian). *Geol. Mag.*, 144: 263–270.

Praca wpłynęła do redakcji 29.03.2010 r.  
Po recenzji akceptowano do druku 8.04.2010 r.



MINISTERSTWO  
ŚRODOWISKA

# *przegląd* **GEOLOGICZNY**



*TOM 58 • NR 12 (GRUDZIEŃ) • 2010*

Cena 12,00 zł  
(w tym 0% VAT)

Indeks 370908  
ISSN-0033-2151

**Zdjęcie na okładce:** Jezioro Moraine w Dolinie Dziesięciu Szczytów (Park Narodowy Banff, zachodnia Alberta, Kanadyjskie Góry Skaliste). Odsłaniają się tu kwarcyty, wapienie oraz dolomity dolnego i środkowego kambriu. Fot. M. Śliwiński (patrz str. 1152)

**Cover photo:** Moraine Lake in the Valley of the Ten Peaks (Banff National Park, western Alberta, Canadian Rocky Mountains). Exposed here are quartzites, limestones and dolostones of Early and Middle Cambrian age. Photo by M. Śliwiński (see p. 1152)