

O poszukiwaniach śladów impaktu w późnym dewonie

Maria Racka*

Prawie dwudziestoletnie poszukiwania anomalii irydowej, minerałów szokowych, mikrotektytów, osadów tsunami i brekcji impaktowych oraz kraterów w utworach z pogranicza franu i famenu (F-F) nie dostarczyły przekonujących dowodów na zaistnienie wielkiego wydarzenia impaktowego, mogącego być przyczyną późnodewońskiego masowego wymierania. Jedyne nie budzące wątpliwości dowody (osady megabrekcji, kwarcze szokowe oraz anomalie irydowa) pochodzą z wczesnego franu Newady i świadczą o impakcie, który miał miejsce około 3 mln lat przed masowym wymieraniem.

Słowa kluczowe: masowe wymieranie, granica fran-famen, impakt, anomalie irydowe, mikrotektyty

Maria Racka — Search for impact evidences in the Late Devonian. *Prz.Geol.*, 47: 364–368.

Summary. Nearly twenty years of searching for an iridium anomaly, shocked minerals, microtektites, impact and tsunami breccias, and craters in the Frasnian-Famennian passage deposits have not provided convincing evidences for an extraterrestrial impact event that could cause the Late Devonian mass extinction. The only unquestionable proof of an impact event (megabreccia deposits, shocked quartz grains, and iridium anomaly) comes from the Early Frasnian of Nevada but this catastrophic episode took place about 3 m.y. before the Frasnian-Famennian extinction.

Key words: mass extinction, Frasnian-Famennian boundary, impact, iridium anomaly, microtektites

Wymieranie w późnym dewonie, zaliczane do pięciu największych kryzysów biologicznych w historii Ziemi, wystąpiło około 367 milionów lat temu i charakteryzowało się gwałtownym zmniejszeniem bioróżnorodności ekosystemów oraz drastycznym obniżeniem morskiej biomasy. Szacuje się, iż wyginęło około 22% wszystkich morskich rodzin i około 57% wszystkich morskich rodzajów (Sepkowski, 1996), a analizy niektórych regionalnych ekosystemów wskazują na utratę co najmniej 70% żyjących tam gatunków (patrz McGhee, 1996, s.26).

Zarówno przyczyna(y) tego wydarzenia, jak i czas jego trwania są przedmiotem ożywionych dyskusji (przegląd w: McGhee, 1996; Hallam & Wignall, 1997). Niektórzy badacze uważają, iż to impakt pozaziemskiego obiektu był czynnikiem inicjującym katastrofalne zmiany w ekosystemach, inni upatrują przyczyn w procesach ziemskich, wśród których uwypukla się rolę zmian eustatycznych, klimatycznych i tektonicznych. Czas trwania kryzysu szacuje się na okres od 3 milionów lat (proces kroczący) do około 100 tysięcy lat (wydarzenie natychmiastowe).

Hipoteza impaktu

Hipoteza późnodewońskiego impaktu, po raz pierwszy zaproponowana przez McLarena (1970) i bazująca na nagłości globalnego zniknięcia płytkowodnej fauny bentosowej na początku famenu, nie spotkała się wówczas z większym zainteresowaniem. Dopiero odkrycie anomalii irydowej w 1980 roku (Alvarez i in., 1980) i zinterpretowanie jej jako materialny ślad upadku bolidu, powodującego masowe wymieranie na granicy kreda-trzeciorzęd (K-T), stało się punktem zwrotnym w badaniach nie tylko osadów z tego pogranicza, ale także z innych poziomów biowypażeń. W ciągu całej dekady lat osiemdziesiątych trwały intensywne poszukiwania początkowo tylko anomalii pierwiastków z grupy platynowców, a później również innych śladów wielkiego uderzenia, takich jak: kratery

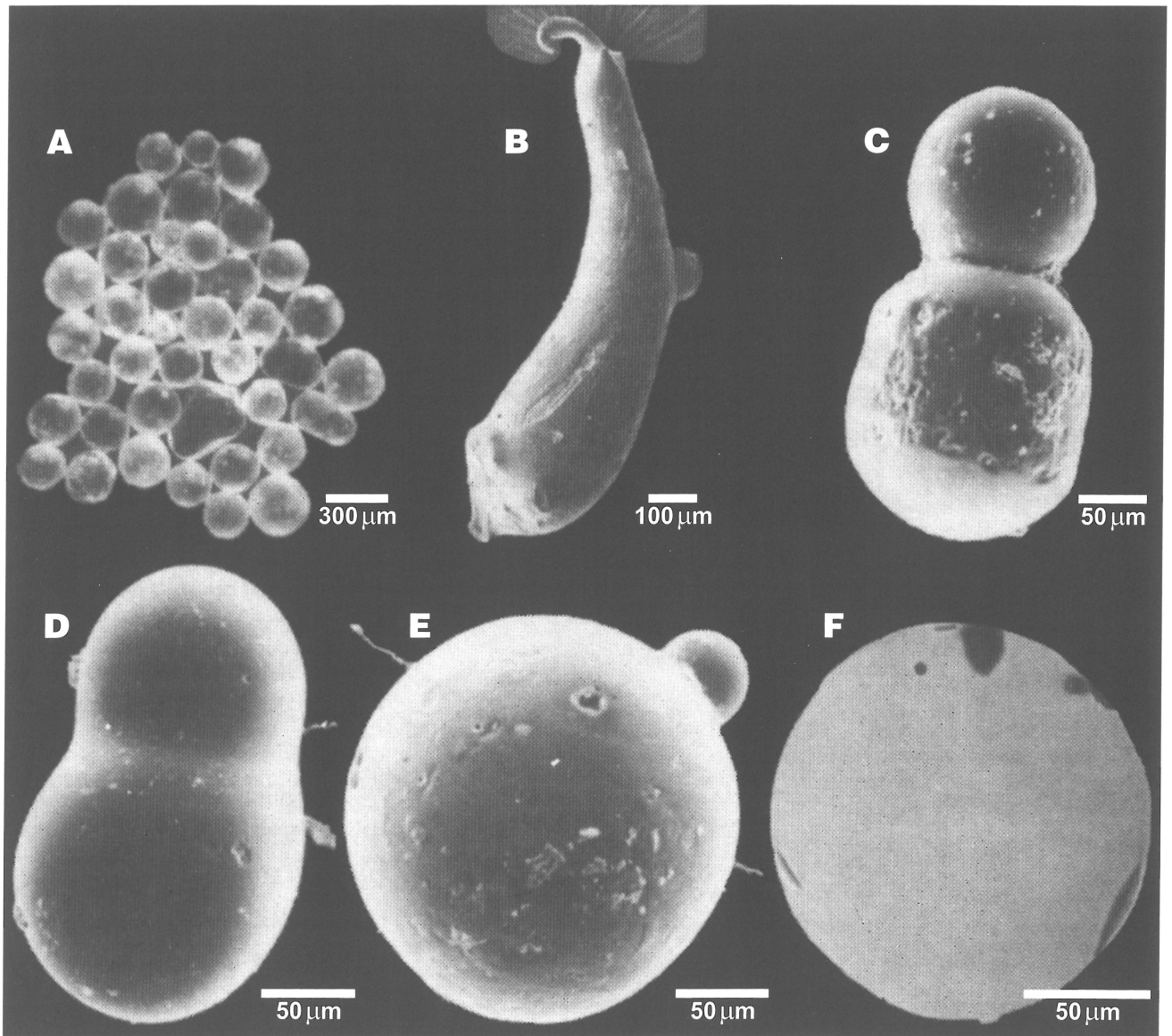
impaktowe, tektyty i mikrotektyty, minerały szokowe oraz brekcje impaktowe czy osady tsunami (Claeys, 1995).

Historia poszukiwań śladów impaktu w dewońskim zapisie osadowym

Stany Zjednoczone i Belgia. Pierwsze geochemiczne badania utworów obejmujących pogranicze franu i famenu (F-F) prowadził McGhee Jr. (McGhee i in., 1984). Dotyczyły one trzech ciągłych i dobrze udokumentowanych stratygraficznie, morskich profili w stanie Nowy Jork (USA) oraz jednego w Belgii. Za pomocą instrumentalnej neutronowej analizy aktywacyjnej (INAA) przeanalizowano 410 próbek na zawartość irydu oraz 36 innych pierwiastków. Nie znaleziono anomalii irydowej w żadnym z badanych profili, a najwyższe stwierdzone zawartości wynosiły 0,119 ppb Ir i 0,112 ppb Ir co stanowiło od 0,2% do 2% wartości uzyskanych dla Ir zawartego w morskich i lądowych osadach pochodzących z granicy K-T.

Australia. Wielkie nadzieje na potwierdzenie hipotezy impaktu na granicy F-F wiązano z odkryciem umiarkowanej anomalii irydowej w późnodewońskiej, silnie skondensowanej sekwencji węglanowej w McWhae Ridge (Canning Basin) w zachodniej Australii (Playford i in., 1984). Oznaczona zawartość 0,30 ppb Ir 20-krotnie przewyższała wartość lokalnego tła, a wzbogaceniu w iryd towarzyszyły także anomalnie wysokie stężenia wielu innych pierwiastków (Fe, Co, Ni, Cu, Mn, Pb, Pt, V, As, Sb, Ce, Th). Przeprowadzono również badania izotopowe węglanów oznaczając $\delta^{13}\text{C}$ oraz $\delta^{18}\text{O}$. Wcześniejsze analizy osadów z granicy K-T ujawniły, iż nagła zmiana wartości $\delta^{13}\text{C}$ może wskazywać na bujny rozkwit lub gwałtowne załamanie produktywności biologicznej planktonu (Hsü i in., 1982). Rozpoznane w McWhae Ridge negatywne przesunięcie wartości $\delta^{13}\text{C}$, wskazujące na znaczną redukcję biomasy, wystąpiło w poziomie anomalii irydowej. Stwierdzono także, iż anomalie te występują w obrębie 12 cm ławicy stromatolitowej powstałej przy współdziałaniu cyjanobakterii z rodzaju *Frutaxites*. Niestety, włókna *Frutaxi-*

*Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski, ul. Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec



Ryc. 1. Mikrosferule z Senzeille; A — zdjęcie spod mikroskopu optycznego; B–F — zdjęcie spod mikroskopu skaningowego (Claeys i in., 1992)

Fig. 1. Light microscope (A) and SEM micrographs (B–F) of glass spherules from the Senzeille shales (Claeys et al., 1992)

tes zawierały od dwóch do pięciu razy więcej analizowanych pierwiastków niż otaczające je tło skalne. Organizmy te mogły zatem wyekstrahować pierwiastki bezpośrednio z wody morskiej. Późniejsze eksperymenty laboratoryjne potwierdziły zdolność niektórych bakterii i grzybów do koncentrowania irydu z roztworów oraz rozpuszczania skał magmowych i meteorytów zawierających iryd (Dyer i in., 1989). Także badania dwóch, podobnych litologicznie i różnych wiekowo (dolny kambr i oligocen) poziomów stromatolitowych w południowo-wschodniej Australii, wykazały jeszcze większe anomalie pierwiastków sydero- i chalkofilnych, w tym platynowców (Wallace i in., 1991).

W McWhae Ridge nie stwierdzono występowania cząstek sferoidalnych ani sanidynowych, których obecność w warstwie z granicy K-T zinterpretowano jako ewidentny ślad impaktu (Smit & Klaver, 1981). Powtórna analiza zespołów konodontowych z Canning Basin umiejscowiła anomalię irydową w dolnej części poziomu kono-

odontowego *crepida*, tzn. 3 zony konodontowe powyżej granicy fran-famen, która według decyzji Międzynarodowej Podkomisji Stratygrafii Dewonu (ISDS) z 1988 roku została umieszczona w spagu fameńskiego poziomu *triangularis*.

Niemcy. W Europie Zachodniej poziom masowego wymierania odpowiada stratygraficznie horyzontowi czarnych łupków i wapieni bitumicznych Kellwasser, a kryzys frańsko-fameński został alternatywnie opisany jako wydarzenie (kryzys) Kellwasser. Badaniom geochemicznym, mającym na celu znalezienie anomalii pierwiastków z grupy platynowców, poddano próbki z odsłonięcia Steinbruch Schmidt w Reńskich Górach Łupkowych w RFN (McGhee i in., 1986). Nie znaleziono anomalii irydowej ani w poziomie odpowiadającym granicy fran-famen, ani w poziomie odpowiadającym australijskiej anomalii z Canning Basin. Nie stwierdzono również występowania magnetycznych lub sanidynowych sferul, ani też szokowo zmienionych ziarn kwarcu, towarzyszących w większości przypadków anomalii irydowej w osadach z granicy kreda-trzeciorzęd

ab. 1. Geochemiczne i mineralogiczne świadectwa domniemanych óznodewońskich impaktów (McGhee, 1996, tab. 9.1, zmodyfikowana)

| Czas (w mln lat) | Świadectwa impaktu |
|--|---|
| poziom wczesny <i>crepida</i> ok. 365,5 mln | — mikrotektyty w Chinach — (?) anomalia irydowa w Australii — negatywna anomalia $\delta^{13}\text{C}$ w Australii i Chinach |
| poziom późny <i>triangularis</i> ok. 366 mln | |
| poziom środkowy <i>triangularis</i> ok. 366,5 mln | |
| poziom wczesny <i>triangularis</i> ok. 367 mln Famen | — (?) krater Siljan w Szwecji (?) — krater Charlevoix w Kanadzie — mikrotektyty w Belgii — 2 anomalie niklowe w Chinach — sferule krzemianowo-niklowe w Chinach |
| Fran poziom <i>linguiformis</i> ok. 367,5 mln | — słabe anomalie irydowe w Chinach — 3 anomalie niklowe w Chinach — sferule krzemianowo-niklowe w Chinach — negatywna anomalia $\delta^{13}\text{C}$ w Chinach i Kanadzie — (?) osady tsunami |
| poziom późny <i>rhenana</i> ok. 368 mln | |
| poziom wczesny <i>rhenana</i> ok. 368,5 mln | |
| poziom <i>jamieae</i> | |
| poziom późny <i>hassi</i> | |
| poziom wczesny <i>hassi</i> | |
| poziom <i>punctata</i> | — kwarcze szokowe, anomalia irydowa oraz osady megabrekcji Alamo w USA |

(Bohor i in., 1984). Badania izotopowe węglanów wykazały nagły wzrost wartości $\delta^{13}\text{C}$ sugerujący rozkwit aktywności biologicznej lub *upwelling*, zamiast spodziewanego negatywnego przesunięcia, odzwierciedlającego gwałtowne załamanie produktywności fitoplanktonu. Podobny wzrost wartości $\delta^{13}\text{C}$ wykazano później dla wielu regionów dewońskiego świata (patrz Hallam & Wignall, 1997), w tym także dla pogranicza F-F z szelfu południowej Polski (Hałas i in., 1992; Racki i in., 1999).

Kanada. Badania profili kanadyjskich w Albercie (Medicine Lake) oraz na Terytorium Północno-Zachodnim (Trout River) również nie dostarczyły dowodów na zaistnienie impaktu (Goodfellow i in., 1989). Stwierdzone podwyższone koncentracje Ir i takich pierwiastków jak Ni, Cu, Co, As pozytywnie korelowały się z zawartością minerałów ilastych i siarczków.

Natomiast anomalnie wysokie wartości $\delta^{13}\text{C}$, zarówno dla węgla węglanowego, jak i organicznego, z negatywnym wahnięciem na samej granicy F-F, w połączeniu z niezwykle wysokimi wartościami $\delta^{34}\text{S}$ w dwóch profilach z Alberty (Cinquefoil Mountain i Medicine Lake) są interpretowane jako zapis stopniowego załamania ekosystemu zakończonych katastrofą kosmiczną (Wang i in., 1996).

Chiny. Słabą anomalię irydową oraz silne negatywne przesunięcie $\delta^{13}\text{C}$ w warstwie zawierającej granicę F-F opisano z profilu w Xiangtian (prowincja Guangxi) w południowych Chinach (Wang i in., 1991). Zawartość irydu wynosząca 0,23 ppb przekraczała 14-krotnie średnie stężenie tego pierwiastka w warstwie leżącej powyżej oraz 5-krotnie średnią zawartość Ir w warstwie leżącej poniżej poziomu wymierania. Anomalii irydowej towarzyszyło wzbogacenie w takie pierwiastki jak: Co, Cr, Fe, As, Sb oraz Al, V, U, Hf, Th, a także zubożenie w Mn. Bezpośrednio poniżej granicy stwierdzono występowanie osadów wapiennej brekcji, ciągnących się ponad kilkaset kilometrów. Nie znaleziono ziarn szokowo zmienionych kwarców ani mikrosferul. Wśród autorów pracy dominują zwolennicy katastroficznej hipotezy wymierania, interpretujący te dane jako zapis impaktu ciała pozaziemskiego na dno oceaniczne w późnym franie w pobliżu południowych Chin. Impakt ten mógł spowodować kryzys biotyczny, dostarczyć irydu oraz doprowadzić do powstania osadów brekcji wskutek tsunami lub (i) trzęsienia ziemi nie generując minerałów szokowych. Pozostali współautorzy uważają, iż anomalne zawartości Ir i pozostałych pierwiastków zostały spowodowane jedynie wskutek redukcyjnych warunków panujących w osadzie.

Mikrosferule — Belgia i Chiny raz jeszcze

W 1992 r. pojawiły się dwa doniesienia o odkryciu szklistych mikrosferul w osadach górnodewońskich Chin i Belgii (Wang, 1992; Claeys i in., 1992). Pierwsze z nich dotyczyło obiektów znalezionych w Chinach w reziduum pojedynczej próbki wapiennej z profilu w Qidong (prowincja Hunan). Próbką zawierającą sferule pochodziła z dolnej części poziomu konodontowego *crepida*, a więc stratygraficznie odpowiadała australijskiej anomalii irydowej w Canning Basin. Została ona znaleziona bezpośrednio poniżej 3-cm warstewki łu z anomalią geochemiczną, zawierającą iryd 3-krotnie przewyższający wartość tła, oraz pierwiastki syderofilne (Fe, Co, Cr) i chalkofilne (Se, As, Sb) wzbogacone o kilka rzędów wielkości, a także negatywne przesunięcie $\delta^{13}\text{C}$. Mikrosferule o średnicach około 100 μm miały rozpryskowe kształty (*splash form*) głównie kuliste i kropłowe, zawierały sferyczne pęcherzyki oraz inkluzje leszatelierytu. Ich skład chemiczny mieścił się w przedziale zmienności charakterystycznym dla znanych mikrotektytów.

W Belgii szkliste mikrosferule, wykazujące morfologiczne i chemiczne podobieństwo do mikrotektytów, znaleziono w obrębie kilkucentymetrowej warstewki łupków w Senzeille w basenie Dinant. Warstewka sferulowa, nie stanowiąca jednostki litologicznie odmiennej w profilu, zawiera się w dolnej części poziomu konodontowego

triangularis co oznacza, iż mikrosferule tam znalezione są starsze od okazów z Qidong o około 1,5 do 2 milionów lat. Są one również większe (od 50 μm do powyżej 1 mm), a ich skład zmienia się w szerszym zakresie. Brak pęcherzyków i krystalitów oraz bardzo niska zawartość wody odróżniają je od szkielek wulkanicznych.

W 1994 roku opublikowano kolejne doniesienie z Belgii o odkryciu drugiego poziomu mikrosferulowego (Claeys i in., 1994; Claeys & Casier, 1994). Sferule znalezione w profilu Hony (90 km od Senzeille), w warstwie leżącej tylko 2 do 3 cm powyżej granicy F-F, są chemicznie identyczne z opisanymi uprzednio. Dla profilu z Hony, posiadającego dobre datowania biostratygraficzne, wykonano również szczegółowe badania geochemiczne mające na celu znalezienie anomalii towarzyszących wystąpieniu mikrotektytów, a w szczególności irydu (Claeys i in., 1994; Claeys i in., 1996). Nie stwierdzono istnienia anomalii irydowej, znaleziono natomiast anomalnie wysokie zawartości pierwiastków chalkofilnych (Zn, As, Sb). Nie wykryto także wystąpień ziarn szokowego kwarcu. Jako prawdopodobne źródło sferul w profilach belgijskich rozważano dwa krateru impaktowe wieku późnodewońskiego. Jeden z nich to Siljan Ring w środkowej Szwecji, będący największą strukturą impaktową w Europie (52 km średnicy), datowany metodą argonową na około 368 ± 1 milionów lat. Drugim miejscem impaktu brany pod uwagę jest krater Charlevoix w Quebec w Kanadzie o średnicy 46 km (datowany na 360 ± 25 mln). Według rekonstrukcji paleogeograficznej w późnym dewonie znajdował się on w bliskim sąsiedztwie profilu belgijskich. Domniemanym źródłem sferul znalezionych w Chinach miał być krater o średnicy 70 km pod jeziorem Taihu. Jednakże szczegółowe badania osadów brekcji występującej na obrzeżeniu jeziora, nie wykazały obecności stopionych skał, a wśród mieszaniny fragmentów skalnych budujących brekcję znaleziono także wapnie karbońskie i permskie, co wyklucza wiek późnodewoński jako czas jej powstania wskutek zajścia wydarzenia o dużej energii, jakim np. mógłby być impakt (Wang i in., 1994). Obecnie znanych jest 6 późnodewońskich struktur impaktowych (patrz McGhee, 1996), jednakże ich datowania są niezbyt precyzyjne, aby mogły służyć jako dowody na rzecz katastroficznej przyczyny wymierania na granicy F-F.

Obecność co najmniej dwóch poziomów sferulowych może świadczyć o zaistnieniu więcej niż jednego wydarzenia impaktowego (Wang i in., 1994; Claeys i in., 1996; McGhee, 1996). Część zwolenników katastrofy kosmicznej w dalszym ciągu rozwija model pojedynczego, gigantycznego impaktu, wykorzystując wystąpienie słabej ujemnej anomalii $\delta^{13}\text{C}$ w ciągłych profilach Kanady (Wang i in., 1996). Brak anomalii irydowej nie jest bowiem silnym argumentem przeciwko pozaziemskej przyczynie kryzysu późnodewońskiego, gdyż bolid (np. kometa) nie musiał być ciałem zasobnym w platynowce (Jansa, 1993). Claeys i in. (1996) porównują wystąpienia frańsko-fameńskich mikrosferul z wystąpieniami kenozoicznych mikrotektytów, którym także nie towarzyszą anomalie irydowe. Koncepcja wielokrotnego impaktu, jako pierwotnej przyczyny wymierania w późnym dewonie, od lat lansowana przez George'a McGhee, zyskała wsparcie w postaci 5 epizodów

niklowo-irydowych i towarzyszących im wystąpieniom krzemianowo-niklowych sferul oraz negatywnych anomalii węglowych (Bai, 1994). Obecność ich stwierdzono wokół granicy F-F (oraz innych granic pięter dewońskich) w południowych Chinach. Według Bai (1994) epizody niklowe są zapisem globalnej lub przynajmniej rozległej, regionalnej aktywności hydrotermalnej, wzdłuż stref rozłamów spowodowanych przez wielokrotne kolizje Ziemi z asteroidami o średnicach około 1 km. Jednakże wyniki badań innych profili, także z południowochińskiej prowincji Hunan, nie potwierdziły tych doniesień (Hou i in., 1996), a zanotowane tam pozytywne przesunięcie $\delta^{13}\text{C}$ na granicy F-F odpowiada zapisowi znanemu z Europy.

Podsumowanie

Jak dotąd w żadnym z analizowanych profili obejmujących granicę F-F nie stwierdzono występowania ewidentnej anomalii irydowej, ani minerałów szokowych. Jedyne dobrze udokumentowane znalezisko ziarn szokowo zmienionych kwarców w osadach dewońskiej megabrekcji pochodzi z wczesnego franu Nevady (Leroux i in., 1995) i jest zapisem późnodewońskiego impaktu, który miał miejsce około 3 miliony lat wcześniej. Ostatnie doniesienia z Nevady informują również o znalezieniu anomalii irydowej — 0,139 ppb Ir 15-krotnie przewyższającej wartość tła (Warne & Kuehner, 1998). Najnowsze publikacje także nie dostarczają argumentów zwolennikom kosmicznej katastrofy. Ponowne, szczegółowe geochemiczno-mineralogiczne opracowanie stratotypu granicy F-F w Coumiac (Montagne Noire) we Francji nie potwierdziło wcześniejszego doniesienia o znalezieniu anomalii irydowej porównywalnej wielkością (5,6 ppb Ir) do tej z granicy K-T (Girard i in., 1997). Natomiast wzbogacenie w platynowce oraz chondrytowe stosunki Ru/Ir i Pt/Pd w dwóch reprezentatywnych profilach ze stanu Nowy Jork (USA), występujące wielokrotnie w obrębie interwału granicy F/F, sugerują raczej nagromadzenie materii pozaziemskej wskutek wolnego tempa sedymentacji lub procesów redystrybucji i koncentracji w warstwach bogatych w piryty i substancję organiczną (Over i in., 1997). Podobne sugestie prezentowane są nawet dla granicy K-T (Bruns i in., 1997). Pojawiło się także doniesienie o możliwości błędnej interpretacji zanieczyszczeń przemysłowych (pochodzących np. z farb do malowania odbłaskowych znaków drogowych) jako wysokokrzemowych mikrotektytów (Marini & Casier, 1997). Tak więc i ten najsilniejszy, jak dotąd argument lobby impaktowego został w pewnym stopniu podważony.

Wyniki poszukiwań śladów impaktu(ów) w późnym dewonie są źródłem frustracji dla wielu zwolenników tej koncepcji (McGhee, 1996). Wiadomo, iż coś się wówczas wydarzyło, ale zapisy geochemiczne są niejasne i często sprzeczne, a świadectwa mineralogiczne pojawiają się nie w tych horyzontach, gdzie były oczekiwane. Katastrofy kosmiczne są jednak nadal brane pod uwagę jako możliwe przyczyny wszystkich pięciu wielkich wymierań, chociaż jak dotąd jedynie impakt na granicy kreda-trzeciorzęd jest dobrze udokumentowany (patrz Hallam & Wignall, 1997).

Niniejszy artykuł powstał w wyniku realizacji projektu badawczego KBN nr 6PO4D 050 11 pt. *Geochemiczny aspekt wymierania na granicy fran-famen na przykładzie szelfu południowej Polski.*

Literatura

- ALVAREZ L.W., ALVAREZ W., ASARO F. & MICHEL H.V. 1980 — Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science*, 208: 1095–1108.
- BAI S.L., BAI Z.Q., MA X.P., WANG D.R. & SUN Y.L. 1994 — Devonian events and biostratigraphy of South China. Peking University Press, Pekin.
- BOHOR B.F., FOORD E.E., MODRESKI P.J. & TRIPLEHORN D.M. 1984 — Mineralogic evidence for an impact event at the Cretaceous-Tertiary boundary. *Science*, 224: 867–869.
- BRUNS P., RAKOCZY H., PERNICKA E. & DULLO W.-CH. 1997 — Slow sedimentation and Ir anomalies at the Cretaceous/Tertiary boundary. *Geol. Rundsch.*, 86: 168–177.
- CLAEYS P. 1995 — When the sky fell on our heads: Identification and interpretation of impact products in the sedimentary record. *Rev. Geophys., Suppl.*: 95–100.
- CLAEYS P. & CASIER J.-G. 1994 — Microtektite-like impact glass associated with the Frasnian-Famennian boundary mass extinction. *Earth and Planet. Sc. Letters*, 122: 303–315.
- CLAEYS P., CASIER J.-G. & MARGOLIS S.V. 1992 — Microtektites and mass extinctions: Evidence for a Late Devonian asteroid impact. *Science*, 257: 1102–1104.
- CLAEYS P., KYTE F.T. & CASIER J.-G. 1994 — Frasnian-Famennian boundary: Mass extinctions anoxic oceans, microtektite layers, but not much iridium? [W:] New developments regarding the KT event and other catastrophes in Earth history. Lunar and Planetary Inst. Houston.
- CLAEYS P., KYTE F.T., HERBOSCH A. & CASIER J.-G. 1996 — Geochemistry of the Frasnian-Famennian boundary in Belgium: Mass extinction, anoxic oceans and microtektite layer, but not much iridium? [W:] Ryder G., Fastovsky D. & Gartner S. (red.), *The Cretaceous-Tertiary event and other catastrophes in Earth history. Spec. Pap. Geol. Soc. Amer.*, 307: 491–50.
- DYER B.D., LYALIKOVA N.N., MURRAY D., DOYLE M., KOLESOV G.M. & KRUMBEIN W.E. 1989 — Role for microorganisms in the formation of iridium anomalies. *Geology*, 17: 1036–1039.
- GIRARD C., ROBIN E., ROCCHIA R., FROGET L. & FEIST R. 1997 — Search for impact remains at the Frasnian-Famennian boundary in the stratotype area, southern France. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 132: 391–397.
- GOODFELLOW W.D., GELDSETZER H., MCLAREN D.J., ORCHARD M.J. & KLAPPER G. 1989 — Geochemical and isotopic anomalies associated with the Frasnian-Famennian extinction. *Hist. Biol.*, 2: 51–72.
- HALLAM A. & WIGNALL P.B. 1997 — Mass extinctions and their aftermath. Oxford University Press, Oxford.
- HAŁAS S., BALIŃSKI A., GRUSZCZYŃSKI M., HOFFMAN A., MAŁKOWSKI K., NARKIEWICZ M. 1992 — Stable isotope record at the Frasnian-Famennian boundary in southern Poland. *N. Jb. Geol. Paläont. Mh.*, 1992: 129–138.
- HOU H.F., MUCHEZ P., SWENNEN R., HERTOGEN J., YAN Z. & ZHOU H.L. 1996 — The Frasnian-Famennian event in Hunan Province, South China: biostratigraphical, sedimentological and geochemical evidence. *Mem. Inst. Geol. Univ. Louvain*, 36: 209–229.
- HSÜ K.J., HE Q., MCKENZIE J.A., WEISSERT H., PERCH-NIELSEN K., OBERHANSLI H., KELTS K., LABRECQUE J., TAUXE L., KRAHENBUHL U., PERCIVAL S.F., WRIGHT R., KARPOFF A.M., PETERSEN N., TUCKER P., POORE R. Z., GOMBOS A.M., PISCIOOTTO K., CARMAN M.F. & SCHREIBER E. 1982 — Mass mortality and its environmental and evolutionary consequences. *Science*, 216: 249–256.
- JANSA L.F. 1993 — Cometary impacts into ocean: their recognition and the threshold constraint for biological extinctions. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 104: 271–286.
- LEROUX H., WARME J.E. & DOUKHAN J.-C. 1995 — Shocked quartz in the Alamo breccia, southern Nevada: Evidence for a Devonian impact event. *Geology*, 23: 1003–1006.
- MARINI F. & CASIER J.-G. 1997 — Glass beads from reflective road markings: potential contaminants versus microtektites? First evaluation. [W:] Impact and extraterrestrial spherules: New tools for global correlation. *Internat. Symposium. Exc. Guide & Abstracts*, Tallin: 31–32.
- MCGHEE G.R. 1996 — The Late Devonian mass extinction: the Frasnian/Famennian crisis. Columbia University Press, New York.
- MCGHEE G.R., GILMORE J.S., ORTH C.J. & OLSEN E. 1984 — No geochemical evidence for an asteroidal impact at late Devonian mass extinction horizon. *Nature*, 308: 629–631.
- MCGHEE G.R., ORTH C.J., QUINTANA L.R., GILMORE J.S. & OLSEN E.J. 1986 — Late Devonian "Kellwasser Event" mass-extinction horizon in Germany: No geochemical evidence for a large body impact. *Geology*, 14: 776–779.
- MCLAREN D.J. 1970 — Time, life, and boundaries. *J. Paleontol.*, 44: 801–815.
- OVER D.J., CONAWAY C.A., KATZ D.J., GOODFELLOW W.D. & GREGOIRE D.C. 1997 — Platinum group element enrichments and possible chondritic Ru:Ir across the Frasnian-Famennian boundary, western New York State. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 132: 399–410.
- PLAYFORD P.E., MCLAREN D.J., ORTH C.J., GILMORE J.S. & GOODFELLOW W.D. 1984 — Iridium anomaly in the Upper Devonian of the Canning Basin, Western Australia. *Science*, 226: 437–439.
- RACKI G., MATYJA H., RACKA M. & JOACHIMSKI M. 1999 — Biostratigraficzne i geochemiczne problemy identyfikacji granicy fran-famen w południowej Polsce. *Prz. Geol.*, 47: 369–372.
- SEPKOSKI J.J. 1996 — Patterns of Phanerozoic extinction: a perspective from global data bases. [W:] Walliser O.H. (red.), *Global events and event stratigraphy in the Phanerozoic*. Springer-Verlag, Berlin: 35–51.
- SMIT J. & KLAVER G. 1981 — Sanidine spherules at the Cretaceous-Tertiary boundary indicate a large impact event. *Nature*, 292: 47–49.
- WALLACE M.W., KEAYS R.R. & GOSTIN V.A. 1991 — Stromatolitic iron oxides: Evidence that sea-level changes can cause sedimentary iridium anomalies. *Geology*, 19: 551–554.
- WALLISER O.H. 1996 — Global events in the Devonian and Carboniferous. [W:] Walliser O.H. (red.), *Global events and event stratigraphy in the Phanerozoic*. Springer-Verlag, Berlin: 233–238.
- WANG K. 1992 — Glassy microspherules (microtektites) from an Upper Devonian limestone. *Science*, 256: 1547–1550.
- WANG K., ORTH C.J., ATTREP M., CHATTERTON B.D.E., HOU H. & GELDSETZER H.H.J. 1991 — Geochemical evidence for a catastrophic biotic event at the Frasnian/Famennian boundary in south China. *Geology*, 19: 776–779.
- WANG K., GELDSETZER H.H.J. & CHATTERTON B.D.E. 1994 — A Late Devonian extraterrestrial impact and extinction in eastern Gondwana: Geochemical, sedimentological, and faunal evidence. [W:] Dressler B.O., Grieve R.A.F. & Sharpton V.L. (red.), *Large meteorite impacts and planetary evolution. Spec. Pap. Geol. Soc. Amer.*, 293: 111–120.
- WANG K., GELDSETZER H.H.J., GOODFELLOW W.D. & KROUSE H.R. 1996 — Carbon and sulfur isotope anomalies across the Frasnian-Famennian extinction boundary, Alberta, Canada. *Geology*, 24: 187–191.
- WARME J.E. & KUEHNER H.-Ch. 1998 — Anatomy of an anomaly: Devonian catastrophic Alamo impact Breccia of Southern Nevada. *Int. Geol. Rev.*, 40: 189–216.