



Poszukiwany świadek naoczny impaktu – kwarc wstrząsowy

Patrycja Wójcik-Tabol¹



Shocked quartz – impact eyewitness wanted. Prz. Geol, 60: 263–266.

Abstract. Most of the craters on the Earth, produced by an impact of meteorite or other space object, have been masked by exogenous processes. Therefore, indirect indicators of the impact such as shocked quartz have been recognized. The impact metamorphism is visibly recorded within quartz by distinctive microstructures. However, only the planar deformation features (PDF) are unquestionable evidences of impact. They should be investigated with particular accuracy because of similarity to endogenic planar microdeformations such as: growth features or metamorphic deformation lamellae. The K/Pg boundary interval from the Polish Outer Carpathians (Skole Unit, Husów Thrust Sheet, Bąkowiec section) have been studied. This note presents difficulties in identifying shock features in quartz grains collected from turbiditic material.

Keywords: impact, shocked quartz, non-impact microstructures, K/Pg boundary, Skole Unit, Carpathians

Od początku swojego istnienia Ziemia narażona jest na bombardowanie przez inne obiekty przemierzające przestrzeń kosmiczną. Nie jest ona uprzywilejowana pod tym względem, choć skutecznie maskuje bezpośrednie dowody kolizji. Skaliste powierzchnie innych ciał niebieskich noszą wyraźne znamiona w postaci kraterów, lecz powierzchnia Ziemi, ustawicznie podlegająca procesom egzogenicznym (m.in. wietrzeniu, erozji, sedimentacji), zabliznia morfologiczne ślady. Wobec braku wyraźnych świadectw, celowe stało się zdefiniowanie alternatywnych lub nawet poszlakowych dowodów impaktów, zwłaszcza, jeśli mogły one zmieniać bieg historii geologicznej. Upadek meteorytu wskazywany jest jako możliwa przyczyna zmian klimatu i kryzysów biotycznych, tzw. wielkich wymierań na granicy fran/famen, trias/jura oraz eocen/oliogocen (Racki, 1999; Hallam, 2006). Jedyna katastrofa ekologiczna na skalę globalną, której związek z upadkiem planetoidy jest mocno udokumentowany, nastąpił na granicy kredy i paleogenu (tradycyjne określenie: K/T lub K/Pg). Pierwotna koncepcja tzw. piekła dantejskiego, zarysowana przez Alvareza i in. (1980), ulegała z czasem modyfikacjom (Ager, 1993; Alvarez, 2003; Schulte i in., 2010). Tym niemniej wpływ pozaziemskiego czynnika na wydarzenia rozgrywające się na granicy kredy i paleogenu jest bezdyskusyjny.

Blisko 200-kilometrowy krater Chicxulub, na półwyspie Jukatan, powstał w czasie uderzenia asteroidy, o średnicy około 10 km, 65 mln lat temu. Kolizja została zarejestrowana na całym globie poprzez zapis geochemiczny – anomalie irydową, stosunki izotopowe ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os oraz zapis mineralogiczny – obecność wysokociśnieniowych odmian krzemionki, tj. coesyty i stiszowitu, stopów i szkliwa, sferuli, a także minerałów zmienionych wstrząsowo (Alvarez, 2003; French & Koeberl, 2010; Schulte i in., 2010).

Ta notatka poświęcona jest jednemu z bardziej pożądanym, pośrednim dowodów impaktu – kwarcowi wstrząsowemu. W kwarcu występują wyraźne i najbardziej diagnostyczne struktury. Jednocześnie jest on powszechnym i

trwałym minerałem, co dodatkowo predestynuje go do roli „naocznego świadka” impaktu.

Fale wstrząsowe o niskim poziomie naprężeń (<10 GPa) mogą powodować powstanie wielokrotnych, równoległych struktur planarnych (od ang. *planar fractures* – PF; Robertson i in., 1968). Struktury typu PF mogą być do złudzenia podobne do przełamu. Pęknięcia mają długość od 0,5 do 5 mm, w zależności od wielkości ziarna i nie dochodzą do jego krawędzi. Ich szerokość wynosi od 3 do 10 μm. Szczeliny oddalone są od siebie na ogół o 100–500 μm i często wypełnione minerałami wtórnymi (French i in., 2004; French & Koeberl, 2010).

Czasem rozwijają się struktury bardziej złożone, składające się z drobniejszych płaszczyzn zawierających ciekłe inkluzje. Płaszczyzny rozkładają się subrównolegle i odbiegają od motywu PF – to tzw. struktury pierzaste (French i in., 2004).

Struktury typu PF nie są jednoznacznymi wskaźnikami impaktu. Można je w ten sposób interpretować jedynie, gdy stowarzyszone są z innymi dowodami, np. wielkoskalowymi zaburzeniami strukturalnymi albo jeśli w jednym ziarnie współwystępują ze strukturami typu PDF – tzw. płaskimi strukturami deformacyjnymi (od ang. *planar deformation features* – PDFs; Engelhardt i Stoffler, 1965; Grieve i in., 1996).

Płaskie struktury deformacyjne typu PDF (Alexopoulos i in., 1988) są bezsprzecznym dowodem działania szoku wywołanego impaktem. Są to struktury wielokrotne, składające się z licznych, równoległych płaszczyzn, o grubości ≤ 1 μm, oddalonych od siebie o kilka mikrometrów. Brak dwójłomności uwidacznia je na tle ziarna kwarcu-gospodarza.

Nadmierny entuzjazm i złudne przeświadczenie o prostocie zadania grożą pułapką zniecierpliwienia i niedostatecznie wnikliwą analizą materiału pozornie tylko oczywistego i powszechnego. W efekcie, elementy związane z normalnym rozwojem kwarcu lub deformacjami tektonicznymi

¹Institut Nauk Geologicznych, Uniwersytet Jagielloński, ul. Oleandry 2a, 30-063 Kraków; p.wojcik-tabol@uj.edu.pl.

mogą zostać błędnie zinterpretowane jako mikrostruktury wstrząsowe.

Obserwacje pod skanningowym mikroskopem elektronowym umożliwiają zaobserwowanie, że optycznie pojedyncza płaszczyzna może składać się z wielu drobniejszych, równoległych płaszczyzn (Gratz i in., 1996). Są one zorientowane według konkretnych płaszczyzn krystalograficznych w kwarcu, tj. $c\{0001\}$, $\omega\{10\bar{1}3\}$ i $\pi\{10\bar{1}2\}$ (Engelhardt & Stöffler, 1965; French & Short, 1968; Alexopoulos i in., 1988; Grieve i in., 1996). Ważne jest przy tym, by zmierzyć kierunki jak najliczniejszej populacji struktur PDF, aby wyniki statystyczne były miarodajne. Pomiary stanowią najbardziej efektywną metodę rozróżniania struktur szokowych od innych, nie impaktowych deformacji w kwarcu.

Świeże PDF składają się ze szkliwa, z czasem ulegającego rekrytalizacji do kwarcu, którego odrębność od minerału gospodarza podkreślają inkluzje. Tak zmienione struktury nazywane są dekorowanymi (ang. *decorated planar deformation features*).

Jako struktury typu PDF, bywają błędnie interpretowane struktury wzrostowe kwarcu. Nadbudowa kryształu skutkuje powstaniem zespołu równoległych pasów. Powstały wzór może przypominać PDF. Jednak struktura wzrostowa zawsze naśladuje płaszczyzny $r/z\{10\bar{1}1\}$ lub $m\{10\bar{1}0\}$.

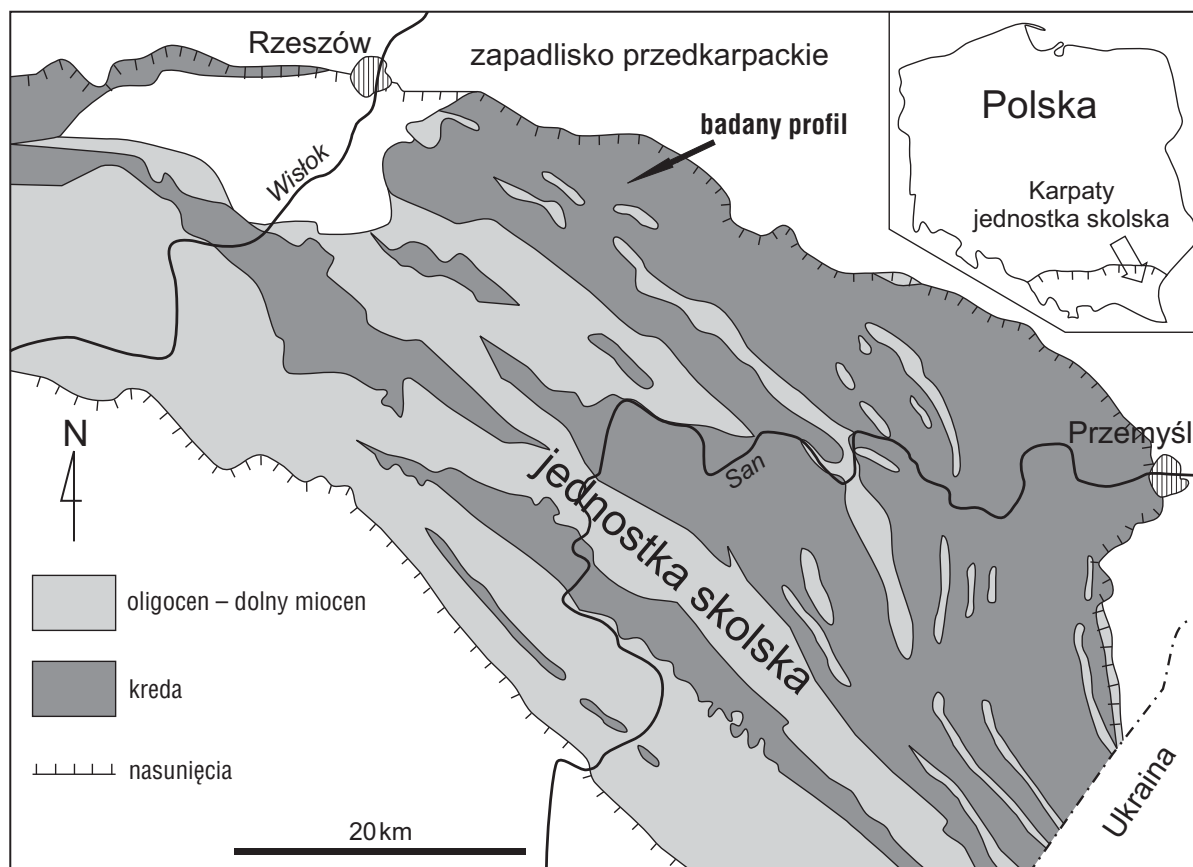
Metamorficzne lamelki deformacyjne (od ang. *metamorphic deformation lamellae* – MDL) bywają także mylone z PDF. Struktury MDL powszechnie występują w kryształach kwarcu skał magmowych i metamorficznych. Stanowi je zespół równoległych lametek, zwykle $\geq 2 \mu\text{m}$

grubości, często lekko ugiętych. Ich granice są zazwyczaj niewyraźne (Carter, 1965; Alexopoulos i in., 1988; Grieve i in., 1996). Lamelki oddalone od siebie o mniej niż $5 \mu\text{m}$ tworzą zwykle jeden system.

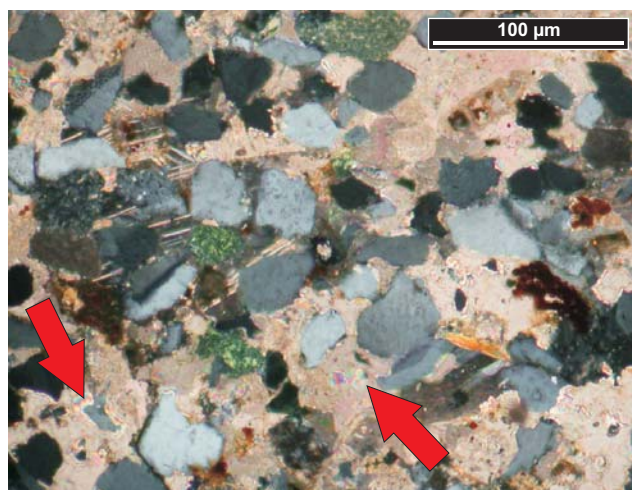
Struktury typu MDL oraz bliźniaki według prawa brzylijskiego mogą powstać wskutek oddziaływania naprężeń $<10 \text{ GPa}$. Są wówczas równoległe względem płaszczyzny (0001), podczas gdy normalna orientacja to $\{10\bar{1}2\}$ (Goltrant i in., 1992). Struktury te zostały opisane z kraterów Meteor Crater (Arizona), Vredefort (Południowa Afryka) (Carter, 1965; Goltrant i in., 1992) i Sudbury (Kanada) (Joreau i in., 1996). Widoczne są one tylko w powiększeniach transmisyjnego mikroskopu elektronowego [TEM].

Granica K/Pg, nosząca znamiona impaktu, ma zasięg globalny i została zdiagnozowana w przeszło 350 rozproszonych profilach (Schulte i in., 2010). W Polsce została ostatnio opisana ze wschodniej części basenu polsko-duńskiego, w rejonie Chełma. Występuje tam warstwa osadu ilastego o 10 cm miąższości, w spągu rdzawego, typu rusty layer. Wiek niżej leżącego osadu oznaczono jako późny mastrycht, zaś warstwa nadległa reprezentuje wczesny dan. Uznano zatem, że osad ilasty stanowi interwał graniczny. Granica K/Pg manifestuje się geochemicznie poprzez anomalne koncentracje Ir, Ni, Au (*vide* Racki i in., 2011).

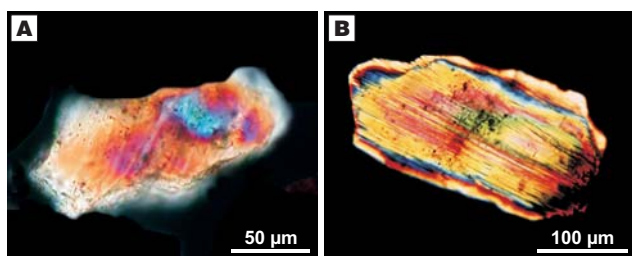
Kilka lat wcześniej, granica kredy i trzeciorzędu została bliżej sprecyzowana w utworach fliszowych w polskich Karpatach zewnętrznych (jednostka skolska, łuska brzeżna w rejonie Husowa, profil Gaj (*vide* Gasiński & Uchman, 2009). Później, w łusce Husowa w profilu Bąkowiec (ryc. 1) granica ta została zawężona do interwału 15 cm miąższości, złożonego z osadu hemipelagicznego,



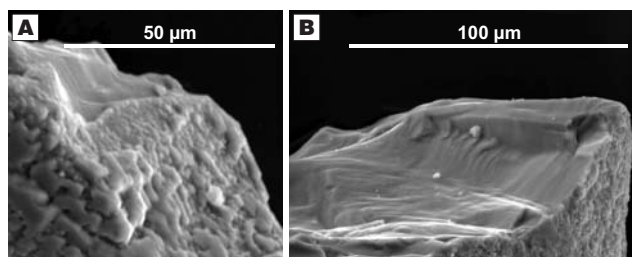
Ryc. 1. Lokalizacja profilu Bąkowiec. Jednostka skolska, polskie Karpaty zewnętrzne (wg Gasiński & Uchman, 2011a)



Ryc. 2. Obraz mikroskopowy badanej skały – drobnoziarnistego piaskowca o cementie węglanowym. Strzałka wskazuje minerały węglanowe „wkraczające” na kwarc i tworzące barwne halo (skrzyżowane polaryzatory)

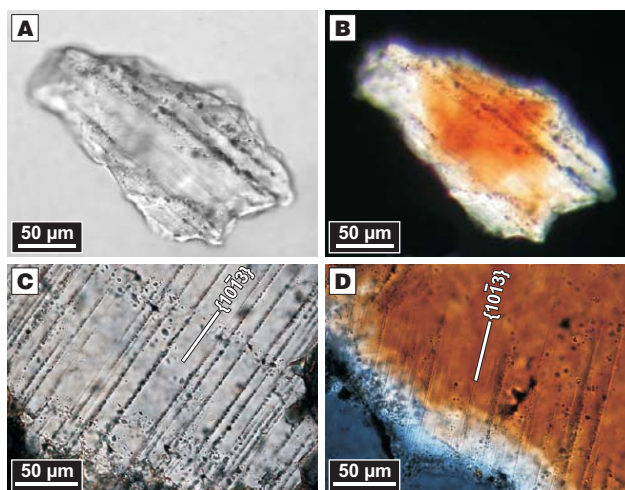


Ryc. 3. A – ziarno kwarcu z badanych prób z profilu Bąkowiec (skrzyżowane polaryzatory, grubość preparatu = 0,06 mm); B – kwarc wstrząsowy, powstały podczas impaktu Chicxulub, znaleziony na Haiti (Science Photo Library/EAST NEWS)



Ryc. 4. A i B – struktury wzrostowe oraz powierzchnie przełamu wewnątrz ziaren kwarcu z badanych prób z profilu Bąkowiec (obraz SEM)

wieńczącego jeden rytm sedymentacji turbidytowej i piaskowca zaczynającego kolejny rytm. Według biostratygrafii otwornicowej, interwał ten znajduje się powyżej poziomu Abathomphalus mayaroensis, który wskazuje na najwyższy mastrycht, a poniżej poziomu pojawienia się pierwszych otwornic indeksowych paleocenu (Gasiński & Uchman, 2011a, b). Ewenementem dla utworów fliszowych jest precyzyjna data i mała miąższość interwału granicznego. Fakty te skłoniły do wszczęcia dalszych poszukiwań, których celem są mineralogiczne oraz geochemiczne ślady impaktu. Analiza mineralogiczna materiału turbidytowego nastręcza trudności, związanych z bogatym inwentarzem ziaren detrytycznych o zróżnicowanej proveniencji pod względem źródła oraz stopnia złożoności historii depozycyjnej (dystans i czas transportu, możliwy recykling).



Ryc. 5. Domniemany kwarc szokowy z badanych prób z profilu Bąkowiec (A – równoległe polaryzatory; B – skrzyżowane polaryzatory); C, D – ziarna kwarcu wstrząsowego z Keurusselkã (Ferrière i in., 2010)

Konieczna jest żmudna analiza poszczególnych ziaren. Obserwacje drobnej frakcji wymagają zastosowania mikroskopu polaryzacyjnego lub elektronowego.

Badania prowadzono korzystając z mikroskopu optycznego NIKON ECLIPSE, E 600 POL oraz mikroskopu elektronowego HITACHI S-4700 i NORAN Vantage przy natężeniu wiązki prądu $I_e = 10 \text{ uA}$, napięciu przyspieszającym 20 kV i ciśnieniu próżni $4 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ w Laboratorium Mikroskopii Skaningowej z Emisją Polową i Mikroanalizy w ING UJ.

Analiza płytki cienkiej ze skały ujawniła obfitość cementu węglanowego, który koroduje ziarna kwarcu. Kryształ węglanów niejako „wkraczają” na ziarna kwarcu, dając efekt tęczowego halo, które maskuje mikrostruktury tego minerału. Nieostra granica pomiędzy cementem i ziarnem kwarcu stwarza złudzenie, że w kwarcu występuje dwukierunkowy system równoległych linii, które de facto okazują się płaszczyznami łupliwości minerałów węglanowych (ryc. 2).

Wyseparowane ziarna w preparacie proszkowym, niepolerowanym, wykazują podwyższoną dwójłomność, zaś inkrustacje minerałami nieprzezroczystymi stwarzają pozory dodatniego reliefu i niosą ze sobą ryzyko przeoczenia tak „nietypowego” obrazu kwarcu lub nadinterpretacji struktur endogenicznych (ryc. 3), czasem nawet innych niż kwarc minerałów (węglanów lub mik). Ziarna kwarcu poddane obserwacjom z zastosowaniem SEM ujawniły głównie struktury wzrostowe oraz powierzchnie przełamu (ryc. 4). Pojedyncze ziarna kwarcu są być może zmienione wstrząsowo (ryc. 5), lecz twierdzenie o tym jest przedwczesne.

Domniemany kwarc szokowy jest ponadto zbyt rzadki i rozproszony, by zastosować metody statystyczne jako najbardziej efektywne. Badania są kontynuowane, równoległe z badaniami geochemicznymi.

Składam serdeczne podziękowania Profesorom C. Koeberlowi (Department of Lithospheric Research, University of Vienna) za konsultacje naukowe oraz A. Gasińskiemu i A. Uchmanowi (Instytut Nauk Geologicznych UJ) za zaproszenie do współpracy, pomoc w gromadzeniu materiału badawczego i twórczą dyskusję naukową. Recenzja dr hab. A. Gawędy wniosła do tekstu cenne

sugestie merytoryczne i metodologiczne. Badania są finansowane z PB MNiSW nr N N307038840.

LITERATURA

- AGER D. 1993 – The New Catastrophism. The Importance of Rare Events in Geological History. Cambridge University Press. Cambridge.
- ALEXOPOULOS J.S., GRIEVE R.A.F. & ROBERTSON P.B. 1988 – Microscopic lamellar deformation features in quartz: discriminative characteristics of shock-generated varieties. *Geology*, 16: 796–799.
- ALVAREZ L. W., ALVAREZ W., ASARO F. & MICHEL H. 1980 – Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science*, 208: 1095–1108.
- ALVAREZ W. 2003 – Comparing the evidence relevant to impact and flood basalt at times of major mass extinctions. *Astrobiology*, 3: 153–161.
- CARTER N.J. 1965 – Basal quartz deformation lamellae – a criterion for recognition of impactites. *Amer. J. Sci.*, 263: 786–806.
- ENGELHARDT W.V. & STÖFFLER D. 1965 – Spaltflächen im Quarz als Anzeichen für Einschläge grosser Meteoriten. *Naturwissenschaften*, 17: 489–490.
- FERRIÈRE L., RAISKILA S., OSINSKI G.O., PESONEN L.J. & LEHTINEN M. 2010 – The Keurusselkä impact structure, Finland-Impact origin confirmed by characterization of planar deformation features in quartz grains. *Meteoritics & Planetary Science*, 45 (3): 434–446.
- FRENCH B.M. & SHORT N.M. 1968 – Shock Metamorphism of Natural Materials. Mono Book Corp, Baltimore, MD.
- FRENCH B.M., CORDUA W.S. & PLESCIA J.B. 2004 – The Rock Elm meteorite impact structure, Wisconsin: geology and shock-metamorphic effects in quartz. *Bull. Geol. Soc. America*, 116: 200–218.
- FRENCH B. M. & KOEBERL C. 2010 – The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn't, and why. *Earth-Science Reviews*, 98: 123–170.
- GASIŃSKI M. A. & UCHMAN A. 2009 – Latest Maastrichtian foraminiferal assemblages from the Husów region (Skole Nappe, Outer Carpathians, Poland). *Geol. Carpath.*, 60 (4): 283–29.
- GASIŃSKI M. A. & UCHMAN A. 2011a – The Cretaceous-Paleogene boundary in turbiditic deposits identified to the bed: a case study from the Skole Nappe, Polish Carpathians. *Geol. Carpath.*, 62 (4): 333–343.
- GASIŃSKI M. A. & UCHMAN A. 2011b – The Cretaceous-Paleogene boundary in turbiditic deposits of the Skole Nappe, Polish Carpathians. *Berichte Geol. B.-A.*, 85 – CBEP 2011, Salzburg, June 5th–8th: 78.
- GOLTRANT O., LEROUX H., DOUKHAN J.-C. & CORDIER P. 1992 – Formation mechanisms of planar deformation features in naturally shocked quartz. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 74: 219–240.
- GRATZ A., FISLER D.K. & BOHOR B.F. 1996 – Distinguishing shocked from tectonically deformed quartz by the use of SEM and chemical etching. *Earth and Planetary Science Letters*, 142: 513–521.
- GRIEVE R.A.F. & PILKINGTON P.B. 1996 – The signature of terrestrial impacts. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 16: 399–420.
- HALLAM T. 2006 – Ewolucja i zagłada. Wielkie wymieranie i jego przyczyny. Prószyński i S-ka, Warszawa.
- JOEAU P., FRENCH B.M. & DOUKHAN J.-C. 1996 – A TEM investigation of shock metamorphism in quartz from the Sudbury structure (Canada). *Earth and Planetary Science Letters*, 138: 137–143.
- RACKI G. 1999 – Kontrowersje wokół przyczyn wielkich katastrof ekologicznych w historii Ziemi: podsumowanie debaty. *Prz. Geol.*, 47: 343–348.
- RACKI G., MACHALSKI M., KOEBERL C. & HARASIMIUK M. 2011 – The weathering modified iridium record of a new Cretaceous-Paleogene site at Lechówka near Chełm, SE Poland, and its palaeobiologic implications. *Acta Palaeont. Pol.*, 56 (1): 205–215.
- ROBERTSON P.B., DENCE M.R. & VOS M.A. 1968 – Deformation in rock-forming minerals from Canadian craters. [W:] French, B.M., Short, N.M. (red.), *Shock Metamorphism of Natural Materials*. Mono Book Corp, Baltimore, MD, s. 433–452.
- SCHULTE P., ALEGRET L., ARENILLAS I., ARZ J.A., BARTON P.J., BOWN P.R., BRALOWER T.J., CHRISTESON G.L., CLAEYS P., COCKELL C.S., COLLINS G.S., DEUTSCH A., GOLDIN T.J., GOTO K., GRAJALES-NISHIMURA J.M., GRIEVE R.A., GULICK S.P., JOHNSON K.R., KIESSLING W., KOEBERL C., KRING D.A., MACLEOD K.G., MATSUI T., MELOSH J., MONTANARI A., MORGAN J.V., NEAL C.R., NICHOLS D.J., NORRIS R.D., PIERAZZO E., RAVIZZA G., REBOLLEDO VIEYRA M., REIMOLD W.U., ROBIN E., SALGE T., SPEIJER R.P., SWEET A.R., URRUTIA-FUCUGAUCHI J., VAJDA V., WHALEN M.T. & WILLUMSEN P.S. 2010 – The Chicxulub asteroid impact and mass extinction at the Cretaceous-Paleogene boundary. *Science*, 327: 1214–1218.

Praca wpłynęła do redakcji 16.11.2011 r.

Po recenzji akceptowano do druku 23.01.2012 r.