

Tomasz BRACHANIEC¹

Początki badań impaktów

Beginnings of impacts research

Abstract: Impacts geology is a multi-disciplinary science, focus aspects of meteoritics, astronomy, petrography, geochemistry, structural geology, sedimentology and geophysics. The first studies of craters began in the 60s. Significant events in the development of this science were: the first research of the Cosmos, development of mineralogical and geochemistry analysis and important papers. Significant progress in the development of research studies reflect the number of newly discovered craters. Many aspects associated with them, such as dating, strewnfields, water impacts are still fairly problematic.

Keywords: impacts, craters, research, geology

Kosmiczne zderzenia jako przykłady najgwałtowniejszych procesów utrwalonych w zapisie geologicznym stały się obiektem badań wielu wybitnych naukowców, m.in.: W. i L. W. Alvarezów, B. M. Frencha, P. Claeysa, P. H. Schultza, E. Chao, M. R. Dence'a, B. D. Dresslera, W. U. Reimolda, V. L. Sharpton, B. P. Glassa, C. Koeberla, G. Graupa, M. M. Grady, R. A. Grieve, G. A. Izetta, H. J. Melosha, E. M. Shoemakera, J. Smita, D. Stöfflera i innych. Przełomowymi wydarzeniami rzucającymi nowe spojrzenie na spadki asteroid na powierzchnię Ziemi było odkrycie związku między kraterem Chicxulub a wielkim późnokredowym wymieraniem (Alvarez i in. 1980), a także uderzenie komety Shoemaker–Levy 9 w Jowisza, które miało miejsce w 1994 roku (Spencer i Mitton, 1995). Wymieranie na granicy K/T jest jedynym na chwilę obecną potwierdzonym masowym kryzysem biologicznym spowodowanym przez impakt, aczkolwiek inne wymierania też często są łączone z upadkami dużych ciał kosmicznych (Ryder i in. 1996; Koeberl i MacLeod, 2002; Buffetaut i Koeberl, 2002). Na chwilę obecną (listopad 2012), na Ziemi zidentyfikowano 75 kraterów impaktowych, mających więcej niż 10 km

¹ *Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi, Katedra Geochemii, Mineralogii i Petrografii, 41-200 Sosnowiec, ul. Będzińska 60; e-mail: tribal216@gmail.com*

średnicy, w tym 13 mających ponad 50 km (dane z Earth Impact Database). Największe z nich powodowały deformacje skał skorupy ziemskiej o objętościach wynoszących tysiące m³ (Dence 1971; Grieve i in. 1977; Grieve i Cintala, 1992; Dressler i Reimold, 2001), a konsekwencje wywołane spadkiem miały zasięg globalny, np. zaburzenia w atmosferze, zmiany klimatyczne, oceanograficzne, rozprzestrzenienie drobnego materiału poimpaktowego po kuli ziemskiej czy tsunami. Do takich struktur zalicza się: Sudbury (Kanada; śr. 250 km; wiek 1,85 mld lat; Grieve i in. 1991; Stöffler i in. 1994), Vredefort (Południowa Afryka; śr. 160 km, wiek 2,02 mld lat; Nicolaysen i Reimold, 1990; Reimold i Gibson, 1996; Brink i in. 1997; Therriault i in. 1997a; Gibson i Reimold, 2001), oraz Chicxulub (Meksyk; śr. 180 km; wiek 65 mln lat; Sharpton i in. 1993, 1996; Morgan i in. 1997).

Procesy powstawania kraterów uderzeniowych, a także towarzyszące tym zjawiskom procesy zostały omówione w pracach m.in. Melosha (1989), Grieve (1991) oraz Frencha (1998). Znaczenie tych procesów dla geologii Ziemi zostało przedstawione w publikacjach Geological Society of America (Silver i Schultz, 1982; Sharpton i Ward, 1990; Dressler i in. 1994; Ryder i in. 1996; Koeberl i Anderson, 1996; Dressler i Sharpton, 1999; Koeberl i MacLeod, 2002), a także opracowaniach zbiorowych „Impact Studies”, tworzonych pod nadzorem European Science Foundation (Gilmour i Koeberl, 2000; Montanari and Koeberl 2000; Buffetaut and Koeberl 2002; Plado and Pesonen 2002; Koeberl and Martinez-Ruiz 2003). Tematyka impaktów została dodatkowo omówiona w wydaniach książkowych: French i Short (1968), Roddy i in. (1977), Melosh (1989) oraz French (1998). Mniejsze kratery zaczynały budzić zainteresowanie od końca lat 70-tych XX wieku (French 1968a), większe zaś później, głównie od roku publikacji artykułu Alvarezów. Z wyjątkiem kilku przykładów (de Laubenfels 1956; McLaren 1970), wcześniej (przed rokiem 1980), świat naukowy w ogóle nie brał pod uwagę dużego impaktu, jako przyczyny katastrofy ekologicznej. Kilku starszych prac, w których starano się przedstawiać tego typu scenariusz nie przyjęto z entuzjazmem (Boon i Albritton, 1937, 1938; Daly 1947; Dietz 1947, 1959; Baldwin 1949). Także geologiczne opracowywania tak znaczących struktur jak Meteor Crater, Ries, Sudbury czy Vredefort toczyły się w szczelnych środowiskach naukowych, nie będąc na początku komentowane na łamach ogólnowiatowych.

Trudne początki

Zasadniczy wpływ na zainteresowanie świata naukowego kraterami meteorytowymi miało lądowanie na Księżycu. Spośród ludzi mających w tym dużo swojego udziału, należy tu wymienić astronautów Ralpa Baldwina i Carlyle’a Beals’a a także geologów Roberta Dietza i Eugene’a Shoemakera (fig. 1a). Impakty jako zdarzenia bardzo gwałtowne, kłóciły się z ogólnie przyjętymi zasadami, jakoby procesy geologiczne były zazwyczaj długotrwałe i powolne (Marvin 1986, 1990, 1999; Glen 1994). Poza lądowaniem na Księżycu, dwa inne zdarzenia miały znaczący wpływ na postrzeganie impaktów. Pierwszym były badania nad tektoniką płyt lito-

sferę. Pozwalały one dostrzec gwałtowność i wielkoskalowość zjawisk geologicznych. W tym samym czasie dzięki misji Apollo zaczęto dostrzegać jak ważną rolę w kształtowaniu naszego Układu Słonecznego zajmują kosmiczne katastrofy. Drugim ważnym wydarzeniem było odkrycie koezytu w 1960 roku (Chao i in. 1960), co zapoczątkowało wnioski wysunięte w pracy W. i L. W. Alvarezów (fig. 1b) 20 lat później. Lata 1960–1963 były szczególnie istotne, jeśli chodzi o identyfikację częściowo już zatartych kraterów. Dzięki analizom petrograficznym oraz geochemicznym możliwa stała się identyfikacja krateru na podstawie obecności impaktytów, a nie jak miało to miejsce do tej pory samych meteorytów. Robert S. Dietz na długo przed 1960 rokiem w swoich pracach (1947, 1959) twierdził, że stożki uderzeniowe są unikalną formą powstałą na skutek spadku ciała kosmicznego. Jego argumenty zostały powszechnie zaakceptowane dopiero po 20 latach, kiedy to na drodze analiz petrograficznych zaczęto badać struktury deformacyjne w kwarcu.

Samo odkrycie minerałów szokowych (koezytu – Chao i in. 1960, Shoemaker i Chao, 1961; stiszowitu – Chao i in. 1962) było dowodem na gwałtownie wyzwolone ogromne ciśnienie, które jak później stwierdzono mogło pochodzić tylko z dużego impaktu. Stosowanie radiometrycznych metod określania wieku pozwoliło na dość dokładne datowanie struktur poimpaktowych (Martini 1978, 1991). Aby zrozumieć procesy towarzyszące spadkowi kosmicznego ciała zaczęto dogłębnie analizować struktury szokowe minerałów, które jak sugerowały badania mogły powstać tylko przy udziale impaktu asteroidy. W 1963 roku kratery meteorytowe stały się przedmiotem opracowań naukowych i dyskusji. W 1963 roku ukazała się publikacja R. Baldwina, w której analizował on powstawanie ziemskich, jak i księżycowych kraterów. Podobna tematyka została poruszona w pracy zbiorowej wydanej w tym samym roku autorstwa Middlehursta i Kuipera, zawierającej 3 osobne artykuły: analizę geologiczną Meteor Crater (Shoemaker 1963), badania stożków uderzeniowych (Dietz 1963a) oraz rozprawę Beals'a i in. (1963) na temat kra-

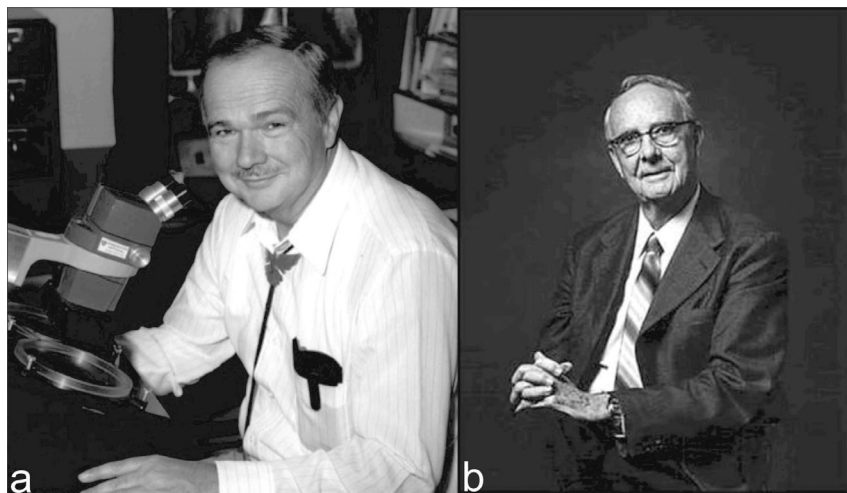


Fig. 1. a) Eugene Shoemaker (1928–1997), b) Luis Walter Alvarez (1911–1988). Zdjęcia z <http://en.wikipedia.org>.

terów kanadyjskich. W latach 70-tych XX wieku zaczęto poznawać dokładnie zjawisko szoku metamorficznego (French 1968a; French i Short 1968; Stöffler 1972, 1974). Między 1960 a 1970 liczba zidentyfikowanych kraterów wzrosła o 66% (z 30 do 50; French 1968a) i w roku 1980 wyniosła już 90 (fig. 2) (Grieve 1998).

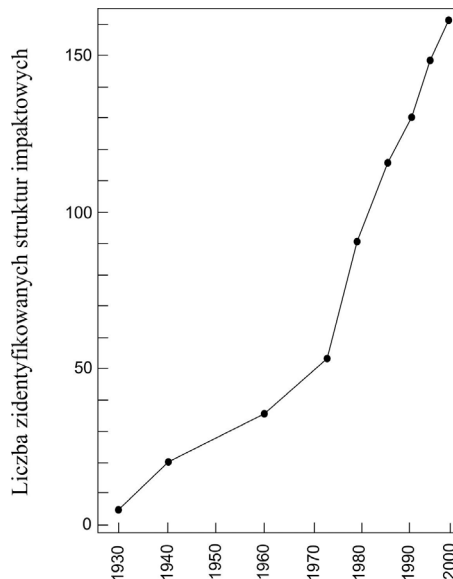


Fig. 2. Wykres przedstawiający liczbę zidentyfikowanych kraterów meteorytowych od 1930 roku. Gwałtowny wzrost odkrywanych struktur od 1960 roku odzwierciedla wykorzystywanie analiz petrograficznych i geochemicznych. Zmodyfikowane z French (2004).

Struktury takie jak Sudbury (Dietz 1964; French 1967, 1968b; Guy-Bray 1972) i Vredefort (Dietz 1961; Hargraves 1961; Manton 1965; Carter 1965; Martini 1978) stały się obiektem coraz to dokładniejszych analiz. Ponadto zaakceptowano fakt, że impakt jest w stanie stopić duże objętości skał podłoża (Dence 1971; Grieve i in. 1977), a także zapisuje się w osadzie anomalią geochemiczną (Palme 1982; Koeberl 1998). Wspomniana wcześniej publikacja Alvarezów z 1980 stała się początkiem nowego rozdziału w geologii impaktów. W tym samym roku ukazały się inne prace (Ganapathy 1980; Smit i Hertogen, 1980), potwierdzające wnioski przełomowego artykułu z *Science*. Wymieranie późno kredowe stało się najczęściej analizowanym kryzysem biotycznym w dziejach Ziemi, a przez to wydaje się, że najlepiej poznanym (m.in. Silver i Schultz, 1982; Raup 1986; Hsü 1986; Glen 1994; Verschuur 1996, Ryder i in. 1996; Powell 1998; Koeberl i MacLeod, 2002).

Poniżej przedstawiono w skrócie kilka zagadnień związanych z badaniami kraterów, które były dość problematyczne, jeśli chodzi o metodykę analiz i interpretację.

Poimpaktowy pył

Po 1980 roku, gdy analizowano licznie jak się okazało występujące profile osadowe z granicy K/T, zwrócono uwagę na drobny materiał poimpaktowy, który po dostaniu się do atmosfery był rozprzestrzeniany na całej kuli ziemskiej. Jego ogromne znaczenie w geologii impaktów obrazuje fakt, iż sam krater Chicxulub zlokalizowano po ponad 10 latach (Hildebrand i in. 1991; Sharpton i in. 1992) od publikacji wniosków Alvarezów o kosmicznej zagładzie 65 mln lat temu, wysuniętych na podstawie samych analiz geochemicznych. Do roku 2000 udało się powiązać kratery o średnicach powyżej 100 km z odpowiadającymi im anomaliami geochemicznymi (Gostin i in. 1986; Williams 1986; Izett i in. 1993; Sturkell i in. 2000; Montanari i Koeberl, 2000), podczas gdy pola rozrzutu tektytów w niektórych przypadkach znajdowano ponad 1000 km od macierzystej struktury (Montanari i Koeberl, 2000). Analizy wykazały, że osady te zawierały szokowo zmieniony kwarc (fig. 3), a także tektyty i mikrotektyty (Grieve 1997; Montanari i Koeberl, 2000). Mogą się one zachować w osadzie pomimo całkowitego zerodowania krateru. Dobrym przykładem jest tu warstwa szklistych sferul kilkunastu cm miąższości w skałach proterozoicznych Południowej Afryki i Australii (Lowe i Byerly, 1986; Lowe i in. 1989; Simonson 1992; Simonson i Hassler, 1997; Simonson i in. 1999; Byerly i in. 2002).

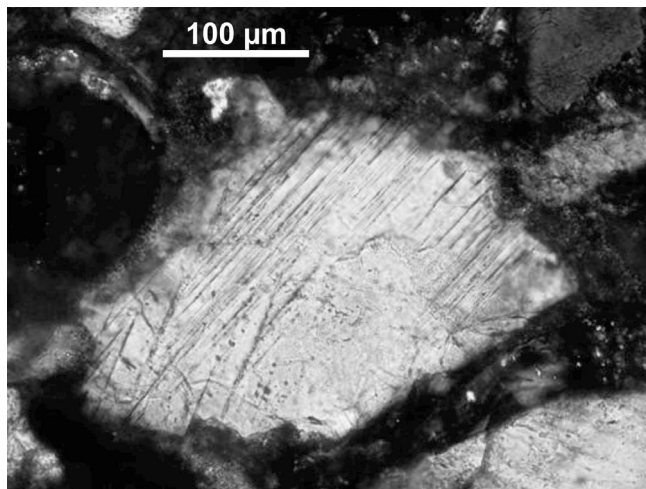


Fig. 3. Płaskie struktury deformacyjne (PDF, ang. *planar deformation features*) w kwarcu szokowym. Zdjęcie z <http://www.impact-structures.com>.

Wiek problematycznych kraterów

Wiele kraterów meteorytowych ze względu na utworzenie w skałach osadowych, a także brak impaktytów stanowi wyzwanie, jeśli chodzi o określenie wieku (Bottomley i in. 1990; Deutsch i Schärer, 1994). Omawiając powyższy problem French (2004) przywołuje przykład krateru Rock Elm. Z racji braku odpowied-

nich skał wiek struktury został początkowo określony na ordowik–plejstocen, a więc jest to przedział czasowy liczący ok. 450 mln lat. Wiele podobnych problematycznie kraterów znajduje się w Stanach Zjednoczonych, co zostało podkreślone w Grieve i in. (1995). W przypadku gdy nie ma możliwości radiometrycznego wyznaczenia wieku, Grieve (1991) sugerował ograniczenie możliwego przedziału czasowego powstania struktury poprzez analizę zmian w jej morfologii, powstałych na skutek erozji. Metodę tą zastosowano przy wyznaczaniu wieku wspomnianego krateru Rock Elm. Jej wynik to ok. 420–440 mln lat, co jest bardzo prawdopodobne, gdyż pokrywa się z analizami biostratygraficznymi (French 2004). Obecność skał magmowych nie tylko jest przydatna w datowaniu. Analiza petrograficzno-geochemiczna impaktytów (fig. 4) może dostarczyć ważnych danych dotyczących powstania krateru i procesów temu towarzyszących. Przedmiotem takich badań są głównie: stopień zszokowania skały macierzystej (French i in. 1970), anomalne zawartości platynowców i pierwiastków syderofilnych (Palme 1982; Koeberl 1998), różnice mineralogiczne między impaktytem a jego pierwotnym odpowiednikiem (French i Nielsen, 1990).

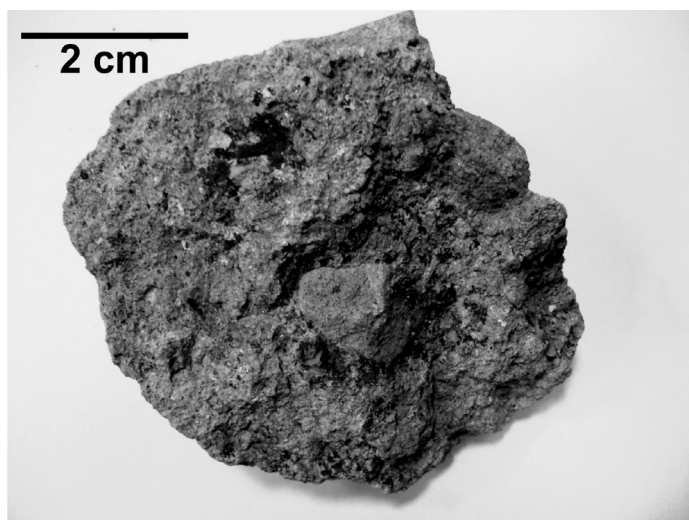


Fig. 4. Suevit krateru Ries, jako przykład impaktytu. Okaz z kolekcji Wydziału Nauk o Ziemi UŚ, nr. WNoZ/Mt/45.

Kraterzy oceaniczne

Kraterzy, które powstały w środowiskach morskich lub częściowo morskich tworzą grupę indywidualną, która była opracowywana na przełomie XX i XXI wieku (m.in. Gersonde i in. 1997; Smelror i in. 2001; Dypvik i Jansa, 2003). Pokrycie Ziemi w przeważającej większości głębokimi zbiornikami wodnymi sugeruje, że możliwe do identyfikacji są głównie te struktury, które powstały na szelfie kontynentalnym bądź częściowo na szelfie i lądzie. Liczba zachowanych kraterów ocea-

nicznych jest ograniczona przez 3 podstawowe czynniki. Pierwszy z nich to fakt, że najstarsze fragmenty dna oceanicznego są wieku jurajskiego, czyli są stosunkowo młode. Drugim jest opór wody uniemożliwiający ciałom mającym mniej niż 1 km średnicy na utworzenie krateru (French 2004). Ostatnim czynnikiem jest zjawisko niszczenia płyt oceanicznych na drodze ruchów litosfery. Mimo to do kraterów podwodnych udało się zaliczyć do nich takie struktury jak m.in.: Chesapeake Bay (USA), Montagnais (Kanada), Mjølnir (Norwegia), Silverpit (Morze Północne), Chicxulub (Meksyk) oraz powstały w głębszym basenie Eltanin (południowo-wschodni Pacyfik). W przypadku podmorskich impaktów kluczową rolę odgrywa zależność wielkość obiektu/głębokość zbiornika wodnego. W jego płytszych strefach przy dużym impakcie woda nie odgrywa żadnej zasadniczej roli, a sam krater przybiera formę bliźniaczą do tej powstałej na lądzie (French 2004). Dla głębszych zbiorników a mniejszych rozmiarów asteroidy morfologia krateru jest zatarta na skutek działania fal tsunami, a także ruchów grawitacyjnych osadu (Gersonde i in. 1997; Ormö i Lindström, 2000; von Dalwigk i Ormö, 2001; Dypvik i Jansa, 2003). Przy umiarowej głębokości zbiornika i średnicy ciała, skały podłoża są rozrywane i wyrzucane wokół miejsca zderzenia, którego energia powoduje tak gwałtowne parowanie wody, że przez chwilę nowo powstały krater jest „pusty”. Zalewająca go woda niszczy jego nowo powstałą morfologię i wypełnia osadami różniącymi się od skał podłoża (Lindström i in. 1996; Ormö i Lindström, 2000; von Dalwigk i Ormö, 2001).

Warunki hydrotermalne

Poprzez wyzwolenie ogromnej energii w podłożu, spadkowi kosmicznego ciała towarzyszą także długoterminowe procesy geologiczne. Brekcjonowanie i deformacje skał mogą mieć znaczenie dla złóż mineralnych i węglowodorów, o czym pisali Grieve i Masaitis (1994), Donofrio (1997) oraz Johnson i Campbell (1997). Ponadto fala uderzeniowa powodująca wyparowanie skał znajdujących się najbliższej miejsca uderzenia znacznie podnosi temperaturę tych znajdujących się dalej. Gdy w pobliżu znajduje się warstwa wodonośna może to doprowadzić do powstania złóż hydrotermalnych (Newsom i in. 1986; McCarville i Crossey, 1996; Boer i in. 1996; Kirsimäe i in. 2002; Naumov 2002, French 2004). Aspekt ten może być w przyszłości niezwykle cenny, ponieważ może wiązać się z badaniami warunków hydrogeologicznych na Marsie, o czym pisali już Allen i in. w 1982 roku.

Obecnie geologia impaktów, jako gałąź geologii jest szeroko rozpowszechniona i ciągle się rozwija. Jest dziedziną multi dyscyplinarną skupiając w sobie aspekty meteorytyki, astronomii, petrografii, geochemii, geologii strukturalnej, sedymentologii czy geofizyki. Pomimo dużej liczby zidentyfikowanych dużych struktur impaktowych (patrz akapit 1) zapewne jeszcze wiele czeka na rozpoznanie. Obecnie rozpoznanie nowego krateru jest dużo łatwiejsze niż jeszcze 30 lat temu. Znalezienie kwarcu szokowego, tektytów bądź odnotowanie wysokiego stężenia platynowców jednoznacznie określa genezę badanej struktury.

Streszczenie

Geologia impaktów znacząco rozwinęła się od roku 1960. Wiązą się z tym odkrycia nowych kraterów, a także początki wykorzystywania nowych metod badawczych. Przełomowa okazała się także publikacja z 1980 roku autorstwa Alvarezów i in., dzięki której świat naukowy dostrzegł znaczenie spadków ciał kosmicznych na geologię Ziemi. W latach kolejnych zaczęły się poszukiwania nowych kraterów, a te największe były także analizowane w kontekście ogólnoswiatowym. Przedmiotem licznych publikacji ukazujących się od lat 60-tych stawały się różne aspekty związane z impaktami, m.in. struktury deformacyjne w minerałach szokowych, pola rozrzutu materiału poimpaktowego czy szok metamorficzny. Mimo znaczącego rozwoju wiedzy na temat spadków ciał kosmicznych wiele aspektów z nimi związanych jest mocno problematycznych, np. datowania w przypadku braku skał magmowych, tworzenie kraterów w środowiskach morskich czy aspekty związane z geologią złóż.

Literatura

- Allen C.C., Gooding J.L., Keil K., 1982, *Hydrothermally altered impact melt rock and breccia: Contributions to the soil of Mars*, Journal of Geophysical Research, 87, s. 10083–10101.
- Alvarez L.W., Alvarez W., Asaro F., Michel H.V., 1980, *Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction*, Science, 208, s. 1095–1108.
- Baldwin R.B., 1949, *The face of the Moon*, Chicago: University of Chicago Press, s. 239.
- Baldwin R.B., 1963, *The measure of the Moon*, Chicago: University of Chicago Press, s. 488.
- Boer R.H., Reimold W.U., Koeberl C., and Kesler S.E., 1996, *Fluid inclusion studies on drill core samples from the Manson impact crater: Evidence for post-impact hydrothermal activity*, [w:] C. Koeberl, R.R. Anderson (red.), *The Manson impact structure: Anatomy of an impact crater*, Boulder: Geological Society of America, Special Paper, 302, s. 377–382.
- Boon J.D., Albritton C.C., 1937, *Meteorite scars in ancient rocks*, Field and Laboratory, 5, s. 53–64.
- Boon J.D., Albritton C.C., 1938, *Established and supposed examples of meteoritic craters and structures*, Field and Laboratory, 6, s. 44–56.
- Bottomley R.J., York D., Grieve R.A.F., 1990, *⁴⁰Argon/³⁹argon dating of impact craters*, Proceedings, 20th Lunar and Planetary Science Conference, s. 421–431.
- Brink M.C., Waanders F.B., Bischoff A.A., 1997, *Vredefort: A model for the anatomy of an astrobleme*, Tectonophysics, 270, s. 83–114.
- Buffetaut E., Koeberl C. (red.), 2002, *Geological and biological effects of impact events*. New York: Springer-Verlag, s. 295.
- Byerly G.R., Lowe D.R., Wooden J.L., Xie X., 2002, *An Archean impact layer from the Pilbara and Kaapvaal Cratons*, Science, 297, s. 1325–1327.
- Carter N.L., 1965, *Basal quartz deformation lamellae: A criterion for the recognition of impactites*, American Journal of Science, 263, s. 786–806.
- Chao E.C.T., Shoemaker E.M., Madsen B.M., 1960, *First natural occurrence of coesite*, Science, 132, s. 220–222.
- Chao E.C.T., Fahey J.J., Littler J., Milton D.J., 1962, *Stishovite, SiO₂, a very high pressure new mineral from Meteor Crater, Arizona*, Journal of Geophysical Research, 67, s. 419–421.

- Daly R.A., 1947, *The Vredefort ring structure of South Africa*, Journal of Geology, 55, s. 125–145.
- de Laubenfels M.W., 1956, *Dinosaur extinction: One more hypothesis*, Journal of Paleontology, 30, s. 207–218.
- Dence M.R., 1971, *Impact melts*, Journal of Geophysical Research, 76, s. 5552–5565.
- Deutsch A., Schärer U., 1994, *Dating terrestrial impact events*, Meteoritics & Planetary Science, 29, s. 301–322.
- Dietz R.S., 1947, *Meteorite impact suggested by the orientation of shatter-cones at the Kentland Indiana disturbance*, Science, 105, s. 42–43.
- Dietz R.S., 1959, *Shatter cones in cryptoexplosion structures (meteorite impact)*, Journal of Geology, 67, s. 650–664.
- Dietz R.S., 1961, *The Vredefort ring structure: Meteorite impactscar?*, Journal of Geology, 69, s. 499–516.
- Dietz R.S., 1964, *Sudbury structure as an astrobleme*, Journal of Geology, 72, s. 412–434.
- Donofrio R.R., 1997, *Survey of hydrocarbon-producing impact structures in North America: Exploration results to date and potential for discovery in Precambrian basement rock*, [w:] K.S. Johnson, A.J. Campbell (red.), *Ames structure in northwest Oklahoma and similar features: Origin and petroleum production*, Norman: University of Oklahoma Press, Oklahoma Geological Survey Circular, 100, s. 17–29.
- Dressler B.D., Reimold W.U., 2001, *Terrestrial impact melt rocks and glasses*, Earth-Science Reviews, 56, s. 205–284.
- Dressler B.O., Sharpton V.L. (red.), 1999, *Large meteorite impacts and planetary evolution II*, Boulder: Geological Society of America, Special Paper, 339, s. 464.
- Dressler B.O., Grieve R.A.F., Sharpton V.L. (red.), 1994, *Large meteorite impacts and planetary evolution*, Boulder: Geological Society of America, Special Paper, 293, s. 348.
- Dypvik H., Jansa L.F., 2003, *Sedimentary signatures and processes during marine bolide impacts: A review*, Sedimentary Geology, 161, s. 309–337.
- French B.M., 1967, *Sudbury structure, Ontario: Some petrographic evidence for origin by meteorite impact*, Science, 156, s. 1094–1098.
- French B.M., 1968a, *Shock metamorphism as a geological process*, [w:] B. M. French, N. M. Short (red.), *Shock metamorphism of natural materials*, Baltimore: Mono Book Corporation, s. 1–17.
- French B.M., 1968b, *Sudbury structure, Ontario: Some petrographic evidence for an origin by meteorite impact*, [w:] B.M. French, N.M. Short (red.), *Shock metamorphism of natural materials*, Baltimore: Mono Book Corporation, s. 383–412.
- French B.M., 1998, *Traces of catastrophe: A handbook of shockmetamorphic effects in terrestrial meteorite impact structures*. Contribution 954. Houston: Lunar and Planetary Institute.
- French B.M., 2004, *The importance of being cratered: The new role of meteorite impact as a normal geological process*, Meteoritics & Planetary Science, 39, s. 169–197.
- French B.M., Short N.M. (red.), 1968, *Shock metamorphism of natural materials*, Baltimore: Mono Book Corporation, s. 644.
- French B.M., Hartung J.B., Short N.M., Dietz R.S., 1970, *Tenoumer crater, Mauritania: Age and petrologic evidence for origin by meteorite impact*, Journal of Geophysical Research, 75, s. 4396–4406.
- French B.M., Nielsen R.L., 1990, *Vredefort bronzite granophyre: Chemical evidence for origin as a meteorite impact melt*, Tectonophysics, 171, s. 119–138.
- Ganapathy R., 1980, *A major meteorite impact on the Earth 65 million years ago*, Science, 209, s. 921–923.

- Gersonde R., Kyte F.T., Bleil U., Dickmann B., Flores J.A., Gohl K., Grahl G., Hagen R., Kuhn G., Sierro F.J., Völker D., Abelmann A., Bostwick J.A., 1997, *Geological record and reconstruction of the late Pliocene impact of the Eltanin asteroid in the southern ocean*, *Nature*, 390, s. 357–363.
- Gibson R.L., Reimold W.U., 2001, *The Vredefort impact structure, South Africa: The scientific evidence and a two-day excursion guide*, Pretoria: Council for Geoscience, South Africa, Memoir, 92, s. 111.
- Gilmour I., Koeberl C. (red.), 2000, *Impacts and the early Earth. Lecture notes in Earth science*, New York: Springer-Verlag, 91, s. 445.
- Glen W. (red.), 1994, *The mass-extinction debates: How science works in a crisis*, Stanford: Stanford University Press, s. 370.
- Gostin V.A., Haines, P.W., Jenkins R.J.F., Compston W., Williams I. S., 1986, *Impact ejecta horizon within Late Precambrian shales, Adelaide Geosyncline, South Australia*, *Science*, 233, s. 198–200.
- Grieve R.A.F., 1991, *Terrestrial impact: The record in the rocks*, *Meteoritics*, 26, s. 175–194.
- Grieve R.A.F., 1997, *Extraterrestrial impact events: The record in the rocks and the stratigraphic column*, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 132, s. 5–23.
- Grieve R.A.F., 1998, *Extraterrestrial impacts on Earth: The evidence and the consequences*, [w:] M.M. Grady, R. Hutchinson, G.J.H. McCall, D.A. Rothery (red.), *Meteorites: Flux with time and impact effects*, London: Geological Society, Special Publication, 140, s. 105–131.
- Grieve R.A.F., Cintala M.J., 1992, *An analysis of differential impact melt-crater scaling and implications for the terrestrial impact record*, *Meteoritics*, 27, s. 526–538.
- Grieve R.A.F., Masaitis V.L., 1994, *The economic potential of terrestrial impact craters*, *International Geological Review*, 36, s. 105–151.
- Grieve R.A.F., Dence M.R., Robertson P.B., 1977, *Cratering process: As interpreted from the occurrence of impact melts*, [w:] D.J. Roddy, R.O. Pepin, R.B. Merrill (red.), *Impact and explosion cratering: Planetary and terrestrial implications*, New York: Pergamon Press, s. 791–814.
- Grieve R.A.F., Stöffler D., Deutsch A., 1991, *Sudbury structure: Controversial or misunderstood?*, *Journal of Geophysical Research*, 96, s. 22753–22764.
- Grieve R.A.F., Rupert J., Smith J., Therriault A., 1995, *The record of terrestrial impact cratering*, *GSA Today*, 5, s. 189–196.
- Guy-Bray J.V. (red.), 1972, *New developments in Sudbury geology*, Toronto: Geological Association of Canada, Special Paper, 10, s. 124.
- Hargraves R.B., 1961, *Shatter cones in the rocks of the Vredefort ring*, *Transactions of the Geological Society of South Africa*, 64, s. 141–167.
- Hildebrand A.R., Penfield G.T., Kring D.A., Pilkington M., Camargo-Zanoguera A., Jacobsen S.B., Boynton W.V., 1991, *Chicxulub crater: A possible Cretaceous/Tertiary impact crater on the Yucatan peninsula, Mexico*, *Geology*, 19, s. 867–871.
- Hsü K., 1986, *The great dying*, Orlando: Harcourt Brace Jovanovich, s. 292.
- Izett G.A., Cobban W.A., Obradovich J.D., Kunk M.J., 1993, *The Manson impact structure: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age and its distal impact ejecta in the Pierre shale in southeastern South Dakota*, *Science*, 262, s. 729–732.
- Johnson K.S., Campbell J.A. (red.), 1997, *Ames structure in northwest Oklahoma and similar features: Origin and petroleum production (1995 symposium)*, Oklahoma Geological Survey Circular 100. Norman: University of Oklahoma, s. 396.

- Kirsimäe K., Suuroja S., Kirs J., Kärki A., Polikarpus M., Puura V., Suuroja K., 2002, *Hornblende alteration and fluid inclusions in Käralla impact crater, Estonia: Evidence for impact-induced hydrothermal activity*, *Meteoritics & Planetary Science*, 37, s. 449–457.
- Koerberl C., 1998, *Identification of meteoritic components in impactites*, [w:] M.M. Grady, R. Hutchinson, G.J.H. McCall, D.A. Rothery (red.), *Meteorites: Flux with time and impact effects*, London: Geological Society, Special Publication, 140, s. 133–153.
- Koerberl C., Anderson R.R. (red.), 1996, *The Manson impact structure, Iowa: Anatomy of an impact crater*, Boulder: Geological Society of America, Special Paper, 302, s. 468.
- Koerberl C., MacLeod K.G. (red.), 2002, *Catastrophic events and mass extinctions: Impacts and beyond*, Boulder: Geological Society of America, Special Paper, 356, s. 746.
- Koerberl C., Martinez-Ruiz F. (red.), 2003, *Impact markers In the stratigraphic record*, New York: Springer-Verlag, s. 363.
- Lindström M., Sturkell E.F.F., Törnberg R., Ormö J., 1996, *The marine impact crater at Lockne, central Sweden*, *Geologiska Föreningens Förhandlingar*, 118, s. 193–206.
- Lowe D.R., Byerly G.R., 1986, *Early Archean silicate spherules of probable impact origin, South Africa and Western Australia*, *Geology*, 14, s. 83–86.
- Lowe D.R., Byerly G.R., Asaro F., Kyte F.J., 1989, *Geological and geochemical record of 3400 million-year-old terrestrial meteorite impacts*, *Science*, 245, s. 959–962.
- Manton W.L., 1965, *The orientation and origin of shatter cones in the Vredefort ring*, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 123, s. 1017–1049.
- Martini J.E.J., 1978, *Coesite and stishovite in the Vredefort dome, South Africa*, *Nature*, 272, s. 715–717.
- Martini J.E.J., 1991, *The nature, distribution, and genesis of the coesite and stishovite associated with pseudotachylite of the Vredefort dome, South Africa*, *Earth and Planetary Science Letters*, 103, s. 285–300.
- Marvin U.B., 1986, *Meteorites, the Moon, and the history of geology*, *Journal of Geological Education*, 34, s. 140–165.
- Marvin U.B., 1990, *Impact and its revolutionary implications for geology*, [w:] V.L. Sharpton, P.D. Ward (red.), *Global catastrophes in Earth history*, Boulder: Geological Society of America, Special Paper, 293, s. 147–154.
- Marvin U.B., 1999, *Impact from space: The implications for uniformitarian geology*, [w:] G.Y. Craig, J.H. Hull (red.), *James Hutton—Present and future*, London: Geological Society, Special Publication, 150, s. 89–117.
- McCarville P., Crossey L.J., 1996, *Post-impact hydrothermal alteration of the Manson impact structure*, [w:] C. Koerberl, R.R. Anderson (red.), *The Manson impact structure, Iowa: Anatomy of an impact crater*, Boulder: Geological Society of America, Special Paper, 302, s. 347–376.
- McLaren D.J., 1970, *Time, life, and boundaries*, *Journal of Paleontology*, 44, s. 801–815.
- Melosh H.J., 1989, *Impact cratering: A geologic process*, New York: Oxford University Press, s. 245.
- Middlehurst B.M., Kuiper G.P. (red.), 1963, *The Moon, meteorites, and comets: The solar system*, Chicago: University of Chicago Press, 4, s. 810.
- Montanari A., Koerberl C., 2000, *Impact stratigraphy: The Italian record*, *Lecture Notes in Earth Sciences*, 93, s. 364.
- Morgan J., Warner M., and the Chicxulub Working Group: Brittan J., Buffler R., Camargo A., Christeson G., Denton P., Hildebrand A., Hobbs R., Macintyre H., Mackenzie G., Maguire P., Marín L., Nakamura Y., Pilkington M., Sharpton V., Snyder D., Suarez G., Trejo A., 1997, *Size and morphology of the Chicxulub impact structure*, *Nature*, 390, s. 472–476.

- Naumov M.V., 2002, *Impact-generated hydrothermal systems: Data from Popigai, Kara, and Puchezh-Katunki impact structures*, [w:] J. Plado, L.J. Pesonen (red.), *Impacts in Precambrian shields*, New York: Springer-Verlag, s. 336.
- Newsom H.E., Graup G., Sowards T., Keil K., 1986, *Fluidization and hydrothermal alteration of the suevite deposit at the Ries crater, West Germany, and implications for Mars. Proceedings*, 17th Lunar and Planetary Science Conference. *Journal of Geophysical Research*, 91, s. E239–E251.
- Nicolaysen L. O., Reimold W. U. (red.), 1990, *Cryptoexplosions and catastrophes in the geological record, with a special focus on the Vredefort structure*, *Tectonophysics*, 171, s. 1–422.
- Ormö J., Lindström M., 2000, *When a cosmic impact strikes the sea bed*, *Geological Magazine*, 137, s. 67–80.
- Palme H., 1982, *Identification of projectiles for large terrestrial impact craters and some implications for the interpretation of Irriich Cretaceous/Tertiary boundary layers*, [w:] L. T. Silver, P. H. Schultz (red.), *Geological implications of impacts of large asteroids and comets on the Earth*, Boulder: Geological Society of America, Special Paper, 190, s. 223–233.
- Plado J., Pesonen L.J. (red.), 2002, *Impacts in Precambrian shields*, New York: Springer-Verlag, s. 336.
- Powell J.L., 1998, *Night comes to the Cretaceous*, New York: W. H. Freeman Company, s. 250.
- Raup D.M., 1986, *The nemesis affair: A story of the death of the dinosaurs and the ways of science*, New York: W.W. Norton & Company, s. 220.
- Reimold W.U., Gibson R.L., 1996, *Geology and evolution of the Vredefort impact structure, South Africa*, *Journal of African Earth Sciences*, 23, s. 125–162.
- Roddy D.J., Pepin R.O., Merrill R.B. (red.), 1977, *Impact and explosion cratering: Planetary and terrestrial implications*, New York: Pergamon Press, s. 1301.
- Ryder G., Fastovsky D., Gartner S. (red.), 1996, *The Cretaceous-Tertiary event and other catastrophes in Earth history*, Boulder: Geological Society of America, Special Paper, 307, s. 569.
- Sharpton V.L., Ward P.D. (red.), 1990, *Global catastrophes in Earth history: An interdisciplinary conference on impacts, volcanism, and mass mortality*, Boulder: Geological Society of America, Special Paper, 247, s. 631.
- Sharpton V.L., Dalrymple G.B., Marín L.E., Ryder G., Schuraytz B.C., Urrutia-Fucugauchi J., 1992, *New links between the Chicxulub impact structure and the Cretaceous/Tertiary boundary*, *Nature*, 359, s. 819–821.
- Sharpton V.L., Burke K., Camargo-Zanoguera A., Hall S.A., Lee A.D., Marín L.E., Suárez-Reynoso G., Quezada-Muñeton J.M., Spudis P.D., Urrutia-Fucugauchi J., 1993, *Chicxulub multiring impact basin: Size and other characteristics derived from gravity analyses*, *Science*, 261, s. 1564–1567.
- Sharpton V.L., Marín L.E., Carney J.L., Lee S., Ryder G., Schuraytz B.C., Sikora P., Spudis P.D., 1996, *A model of the Chicxulub impact basin based on evaluation of geophysical data, well logs, and drill core samples*, [w:] G. Ryder, D. Fastovsky, S. Gartner (red.), *The Cretaceous-Tertiary event and other catastrophes in Earth history*, Boulder: Geological Society of America, Special Paper, 307, s. 55–74.
- Shoemaker E.M., Chao E.C.T., 1961, *New evidence for the impact origin of the Ries basin, Bavaria, Germany*, *Journal of Geophysical Research*, 66, s. 3371–3378.
- Silver L.T., Schultz P.H. (red.), 1982, *Geological implications of impacts of large asteroids and comets on the Earth*, Boulder: Geological Society of America, Special Paper, 190, s. 528.
- Simonson B.M., 1992, *Geological evidence for a strewn field of impact spherules in the early Precambrian Hamersley basin of western Australia*, *Geological Society of America Bulletin*, 104, s. 829–839.

- Simonson B.M., Hassler S.W., 1997, *Revised correlations in the Early Precambrian Hamersley basin based on a horizon of resedimented impact spherules*, Australian Journal of Earth Science, 44, s. 37–48.
- Simonson B.M., Hassler A.W., Beukes N.J., 1999, *A Late Archean impact spherule layer in South Africa that may correlate with a Western Australian layer*, [w:] B.O. Dressler, V.L. Sharpton (red.), *Large meteorite impacts and planetary evolution II*, Boulder: Geological Society of America, Special Paper, 339, s. 249–261.
- Smelror M., Dypvik H., Tsikalas F. (red.), 2001, *Submarine craters and ejecta-crater correlation*, NGF Abstracts and Proceedings of the Norwegian Geological Society, 1, s. 112.
- Smit J., Hertogen J., 1980, *An extraterrestrial event at the Cretaceous-Tertiary boundary*, Nature, 285, s. 198–200.
- Spencer J.R., Mitton J. (red.), 1995, *The great comet crash: The impact of comet Shoemaker-Levy 9 on Jupiter*, New York: Cambridge University Press, s. 118.
- Stöffler D., Deutsch A., Avermann M., Bischoff L., Brockmeyer P., Buhl D., Lakomy R., Müller-Mohr V., 1994, *The formation of the Sudbury structure, Canada: Toward a unified impact model*, [w:] B. O. Dressler, R. A. Grieve, V. L. Sharpton (red.), *Large meteorite impacts and planetary evolution*, Boulder: Geological Society of America, Special Paper, 293, s. 303–318.
- Sturkell E., Ormö J., Nölvak J., Wallin Å., 2000, *Distant ejecta from the Lockne marine-target impact crater, Sweden*, Meteoritics & Planetary Science, 35, s. 929–936.
- Therriault A.M., Grieve R.A.F., Reimold W.U., 1997a, *Original size of the Vredefort structure: Implications for the geological evolution of the Witwatersrand basin*, Meteoritics & Planetary Science, 32, s. 71–77.
- Verschuur G.L., 1996, *Impact! The threat of comets and asteroids*, New York: Oxford University Press, s. 237.
- von Dalwigk I., Ormö J., 2001, *Formation of resurge gullies at impacts at sea: The Lockne crater, Sweden*, Meteoritics & Planetary Science, 36, s. 359–369.
- Williams G.E., 1986, *The Acraman impact structure: Source of ejecta in Late Precambrian shales, South Australia*, Science, 233, s. 200–203.