



## Znaczenie ekonomiczne kraterów meteorytowych

Małgorzata Telecka<sup>1</sup>**Economic importance of meteorite craters.** Prz. Geol., 62: 240–244.

*Abstract.* Commercial deposits in impact structures are world-class range resources. They contain the most important resources of copper, nickel, uranium, gold, platinum group elements and hydrocarbons. Terrestrial craters are also sources of mineral waters and building materials, and they can be reservoirs of hydropower. There are three types of deposits in meteorite craters: progenetic – originate before impact, syngenetic – originate during impact, and epigenetic – result from postimpact processes. The estimated number of Earth's craters suggests that impact structures can be potentially good sources of economic deposits and tourism resources.

**Keywords:** crater deposits, impact structures, economic geology

Dotychczas potwierdzono istnienie 184 kraterów meteorytowych na powierzchni Ziemi (Earth Impact Database, 2013). Obserwacje innych ciał w Układzie Słonecznym, w tym najbliższego Ziemi obiektu – Księżyc, jak również Marsa, Wenus i planetoid pasa głównego, pozwalają przypuszczać, że liczba ta jest jedynie niewielkim ułamkiem wszystkich utworzonych form impaktowych. Szacuje się, że rzeczywista liczba kraterów o średnicy przekraczającej 20 km powstałych na naszym globie w ciągu ostatnich 3,8 mld lat, czyli od chwili ustania wielkiego bombardowania (*late heavy bombardment*), mogła wynosić 8000–12 000 (Glikson, 2001). Kraterów o rozmiarach powyżej 100 km mogło być nawet 300–550, natomiast astrobleatów o rozmiarach rzędu mórz księżycowych (ponad 500 km średnicy), zgodnie z tym oszacowaniem, powstało ok. 20 (Glikson, 2001).

W około 25% poznanych dotychczas kraterów odnaleziono złoża o potencjale ekonomicznym (Grieve, 2003, 2005; Reimold i in., 2005). Obecnie wykorzystywana jest jedynie połowa z nich (Masaitis, 1991; Westbroek & Stewart, 1996; Grieve, 2003, 2005; Reimold i in., 2005). Wydobywca wartość tych zasobów to kwota rzędu kilkunastu miliardów USD. Oszacowania te nie obejmują złóż materiałów budowlanych, których wartość w samych Niemczech w latach 90. XX w. wynosiła ponad 50 mln USD, a także wodnej energii elektrycznej, która w tym samym czasie w jednym tylko kraterze Manicouagan (Kanada) dawała 200 mln USD dochodu na rok (Westbroek & Stewart, 1996).

Odkrycia kraterów meteorytowych są nierozdzielnie związane z poszukiwaniami złóż metali i ropy naftowej. Wiele struktur impaktowych (np. krater Chicxulub w Meksyku, Silverpit na dnie Morza Północnego czy Vredefort w Republice Południowej Afryki; Earth Impact Database, 2013) rozpoznano w czasie poszukiwań i eksploatacji surowców mineralnych, skalnych i bituminów. Celem artykułu jest wskazanie zależności odwrotnej, czyli przedstawienie kraterów meteorytowych jako potencjalnych miejsc

poszukiwań złóż mineralnych i ropy naftowej, a także uściślenie klasyfikacji tych złóż ze względu na ich genezę. Brak wielkich kolizji meteorytowych w czasach historycznych sprawia, że powstawanie kraterów impaktowych jest traktowane marginalnie, a przecież kolizje asteroid i komet nie tylko doprowadziły do powstania Ziemi i Księżyc (Montmerle i in., 2006), lecz również do powstania lub udostępnienia najbardziej istotnych pod względem ekonomicznym surowców.

#### PRZEMIANY SKAŁ W KRATERACH METEORYTOWYCH

Powstanie złóż w kraterach meteorytowych jest konsekwencją kolizji obiektów kosmicznych takich jak asteroidy (planetoidy) i komety z powierzchnią Ziemi. Energia kinetyczna uderzających ciał zależy od ich masy, a także od kwadratu prędkości względnej Ziemi i asteroidy. Średnia prędkość orbitalna Ziemi wynosi 30 km/s, średnie prędkości asteroid mieszczą się w przedziale 15–25 km/s, natomiast prędkości komet dochodzą do 60 km/s. Oznacza to, że maksymalna sumaryczna prędkość kolizji może wynosić nawet 90 km/s (Morbidelli, 2005). Ciśnienia w miejscu kolizji sięgają setek gigapaskali, co prowadzi do nieodwracalnych przemian skał skorupy ziemskiej. Ulegają one spękananiu, przetapianiu i są wyrzucane z miejsca uderzenia. Energię uderzającego obiektu można oszacować na podstawie wzoru (Booth, 2010):

$$E = \left( \frac{\rho g D}{2,5} \right)^4$$

gdzie:

$\rho$  – gęstość skał podłoża [ $\text{kg/m}^3$ ],  
 $g$  – przyspieszenie grawitacyjne [ $\text{m/s}^2$ ],  
 $D$  – średnica krateru [ $\text{m}$ ].

<sup>1</sup> Wydział Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie, al. Kraśnicka 2cd, 20-718 Lublin; rapaiti@o2.pl.

**Tab. 1.** Oddziaływanie fali uderzeniowej na skały i minerały podłoża (French, 1998)**Table 1.** Shock waves effects in basement rocks and minerals (French, 1998)

Ciśnienie fali <i>Shock pressure</i> [GPa]	Wpływ fali na skały podłoża <i>Effects of the shock pressure</i>
<2	powstanie brekcji impaktowej (suevitu) <i>impact breccia (suevite)</i>
2–30	powstanie stożków szokowych <i>shatter cones</i>
8–25	powstanie minerałów szokowych (np. kwarcu szokowego) <i>shock minerals (e.g. shock quartz)</i>
25–40	powstanie postaci amorficznych niektórych minerałów (szkliwa) <i>amorphous form of some minerals (glasses)</i>
35–60	selektywne topienie skał i zmiany ich tekstury <i>selective melting of rocks</i>
60–100	całkowite stopienie skał podłoża <i>total melting of basement rocks</i>
>100	całkowita ewaporacja skał <i>total evaporation of rock</i>

Eksperymentalna kolizja przeprowadzona w 2005 r. na komecie 9P/Tempel wskazuje, że ok. 68% energii kinetycznej uderzającego ciała zostaje wykorzystane do rozbicia skał podłoża, 16% na ogrzanie ich, 12% na ogrzanie i wyrzucenie wody i skał podłoża do atmosfery, a 3% na rozpad asteroidy lub komety. Kolizje ziemskie można uznać za zbliżone do tego modelu (Schultz i in., 2007; Groussin i in., 2010).

Powstanie krateru obejmuje trzy główne etapy: kompresję skał, ich reakcję na falę uderzeniową, związaną z wyrzucaniem materiału z krateru, i dalsze przemiany po ustaniu bezpośrednich oddziaływań uderzającego obiektu. Pierwszy etap trwa kilka sekund i jest bezpośrednim wynikiem uderzenia asteroidy lub komety. W skałach związanych z meteoritami może zagłębić się nawet na głębokość dwóch swoich średnic, nim powstanie fala uderzeniowa (French, 1998). Fala ta rozchodzi się promieniście z miejsca kolizji, a jej prędkość może przekraczać 10 km/s. Energia fali uderzeniowej maleje wraz z odległością od miejsca impaktu (French, 1998). Część energii fali zostaje zużyta na przekształcenia termiczne i spękanie skał podłoża, a część jest zamieniana na energię kinetyczną skał (French, 1998). W zależności od ciśnienia fali uderzeniowej skały i minerały podłoża w różnym stopniu ulegają metamorfizmowi szokowemu (tab. 1). Po ustąpieniu bezpośredniego oddziaływania uderzającego ciała i fali uderzeniowej następuje etap reakcji skał skorupy, który trwa od kilku sekund do dwóch minut. Dochodzi wtedy do wyrzucenia znacznej objętości materiału skalnego z miejsca kolizji i do uformowania krateru. W przypadku dużych kraterów w czasie tego etapu tworzy się wyniesienie centralne z koncentrycznie ułożonymi kręgami wzniesień<sup>2</sup> (Collins i in.,

2005; Melosh & Collins, 2005). Ostatni etap związany jest z osuwaniem się zboczy krateru i wypełnianiem utworzonej niecki młodszymi skałami osadowymi powstającymi z okruszków skał podłoża. W przypadku największych kraterów ubytek skał wywołuje izostatyczną reakcję podłoża (Melosh, 1989).

Każdy z etapów formowania krateru został opisany oddzielnie, jednak procesy te często zachodzą równocześnie – np. oddziaływanie fali uderzeniowej na głębiej położone skały jest równoczesne z wyrzucaniem skał z krateru (Melosh, 1989; French, 1998).

Najczęściej wykorzystywaną skałą powstającą w wyniku kolizji jest brekcja impaktowa (suevit), która używana jest m.in. jako materiał budowlany.

## RODZAJE ZŁOŻ KRATEROWYCH

Z kraterami związane są liczne złoża użyteczne z punktu widzenia człowieka. Dzieli się je na trzy grupy: progenityczne, syngenityczne i epigenetyczne (Grieve & Masaitis, 1994; Grieve, 2003, 2005; Reimold i in., 2005).

**Złoża progenetyczne** to złoża istniejące wcześniej, których eksploatacja została ułatwiona na skutek kolizji kosmicznej (Grieve, 2003, 2005). Mogą one być jednocześnie wzbogacone rudami lub metalami pochodzącymi z uderzającego obiektu (Masaitis, 1991; Grieve, 2005; Reimold i in., 2005). Przykład stanowią złoża rud metali (m.in. uranu i złota) w kraterze Vredefort w RPA.

**Złoża syngenityczne** powstają bezpośrednio w wyniku uderzenia bolidu w Ziemię. Należą do nich m.in. złoża metali pochodzących z meteorytu i diamentów poimpaktowych oraz brekcja impaktowa (Masaitis, 1991; Grieve, 2005; Reimold i in., 2005; Osinski & Pierazzo, 2013).

**Złoża epigenetyczne** są najbardziej zróżnicowane. Powstają w efekcie poimpaktowych procesów termalnych i hydrotermalnych (energia cieplna pochodzi z przekształcenia energii kinetycznej uderzającego ciała) lub osadzania się ziemskiej materii w jeziorach poimpaktowych (dotyczy to m.in. skał wapiennych czy ewaporatów, ale również ropy naftowej i gazu ziemnego). Mogą to być także złoża zgromadzone w pułapkach<sup>3</sup>, jakimi są zagłębienia impaktowe (Reimold i in., 2005).

Wyniki badań geologicznych wskazują, że złoża kraterowe o potencjale ekonomicznym zlokalizowane są zazwyczaj w strukturach o średnicy przekraczającej 5–10 km (Grieve, 2005). Oznacza to, że 115 (czyli 63%) spośród dotychczas poznanych kraterów jest odpowiedniej wielkości i może zawierać złoża, których wydobycie byłoby opłacalne (jak już wspomniano złoża te zlokalizowano do tej pory jedynie w 25% kraterów). Otoczenie mniejszych kraterów może być również eksplorowane w celu wydobycia fragmentów meteorytu, jak to się dzieje m.in. w przypadku polskich kraterów Morasko czy Krateru Meteorowego w Arizonie.

<sup>2</sup> Skorupa ziemiska w czasie kolizji z dużymi obiektami kosmicznymi zachowuje się jak ciało sprężyste i odkształca, tworząc wyniesienie centralne, a w niektórych przypadkach również koncentrycznie ułożone wyniesienie lub wyniesienia. Takie kratery nazywane są kraterami złożonymi.

<sup>3</sup> W literaturze anglojęzycznej używa się określenia „pułapka” (*trap*) sugerującego pułapkę geologiczną, mimo że w przypadku krateru ropa nie jest uwięziona między warstwami nieprzepuszczalnymi.

Głównymi zasobami ekonomicznymi związanymi z kraterami impaktowymi są rudy metali (miedzi, niklu, żelaza, platynowców i złota), węglowodory (ropa naftowa i gaz ziemny), ewaporaty i woda (Westbroek & Stewart, 1996; Grieve, 2003; Reimold i in., 2005).

### Złoża progenetyczne

Największe złoża progenetyczne znajdują się w kraterze Vredefort w RPA. W odsłoniętych i wyniesionych przez kolizję skałach występują m.in. złoża uranu (45% znanych złóż światowych) i złota (40–50% światowego wydobycia; Reimold, 1995; Reimold i in., 2005). Ich wartość wydobywcza w latach 90. XX w. wynosiła blisko 7 mld USD (Westbroek & Stewart, 1996). Na początku XXI w. wydobycie uranu zmniejszyło się o niemal jedną czwartą (Dasnois, 2012).

Progenetyczny uran znajduje się również w kraterze Carswell w Kanadzie. Po kolizji centralna część tego krateru została wyniesiona na ok. 2 km w tzw. wyniesieniu centralnym, a jego dno pokrywa brekcja impaktowa, ułatwiająca wydobycie i przetwarzanie rudy. Kolizja doprowadziła także do niewielkiej remobilizacji złóż uranu (Reimold i in., 2005). Wartość wydobywanych na tym obszarze rud uranu szacowana była w latach 90. XX w. na 1 mld USD rocznie (Westbroek & Stewart, 1996). Kopalnia działała 22 lata (do 2002 r.) i w tym czasie wydobyto 28 123 t tzw. *yellowcake*, czyli półproduktu otrzymywanego w czasie obróbki rud uranu (Canadian Nuclear Safety Commission, 2003).

Za progenetyczne można też uznać złoża żelaza w kraterze Ternowka (Krzywy Róg, Ukraina). Zostały one wymieszane z brekcją impaktową, co zmniejszyło procentową zawartość żelaza w skałach, jednak wyniesienie i pokruszenie skał w kraterze ułatwiło eksploatację i przetwarzanie rudy (Reimold i in., 2005).

Niektórzy autorzy, jak np. Marakushev i in. (1998), do złóż progenetycznych zaliczają także złoża zawierające diamenty. Odrzucili oni teorię powstawania tych minerałów zakładającą, że tworzą się one w wyniku ogromnych ciśnień i wysokich temperatur występujących wskutek kolizji. Według tych autorów znalezione w kraterach meteorytowych Popigaj i Puczeż-Katunski (Rosja) okazy o rozmiarach powyżej 1 mm powstały nie w czasie kolizji, tylko w efekcie zastygania magmy w skorupie ziemskiej (zjawisko to jest podobne do tego, które doprowadziło do utworzenia kimberlitów), natomiast uderzenie bolidów i powstanie kraterów sprawiło, że eksploatacja tych złóż stała się opłacalna lub w ogóle jest możliwa z zastosowaniem dzisiejszych technologii (Marakushev i in., 1998). Kwestia powstawania diamentów w kraterach wymaga dalszych badań geologicznych.

Problemy klasyfikacyjnych przysparzają również minerały i skały meteorytowe. Zgodnie z definicją złożami progenetycznymi są złoża powstałe wcześniej, które zostały udostępnione w wyniku kolizji (Grieve, 2003), więc minerały meteorytowe powinny znajdować się właśnie w tej grupie, gdyż istniały już przed kolizją bolidu z powierzchnią Ziemi. Najczęściej włączane są jednak do grupy złóż syngenetycznych, ze względu na to, że przed kolizją nie było ich na powierzchni naszego globu. Taka klasyfika-

cja wydaje się nieuzasadniona. Minerale te nie powstały w wyniku bezpośredniego oddziaływania kolizji, co pozwalałoby zaliczyć je do złóż syngenetycznych, a jedynie zostały udostępnione w czasie zderzenia, co kwalifikuje je do złóż progenetycznych. Przykładem przynoszonych przez asteroidy minerałów, które na Ziemi mogą utworzyć złoża, są m.in. diamenty meteorytowe znajdujące w chondrytach węglistych, enstatytowych, zwyczajnych i w niektórych meteorytach żelaznych, np. Canyon Diablo w USA (Marakushev i in., 1998), a także żelazo, nikiel i platynowce (Masaitis, 1991).

### Złoża syngenetyczne

Najbardziej typowymi złożami syngenetycznymi są złoża brekcji impaktowej, wykorzystywanej w budownictwie, a także osady zawierające różnego rodzaju tektyty. Jednym z najbardziej znanych obszarów wydobycia brekcji pokolizyjnej jest krater Ries w Niemczech (Reimold i in., 2005). Pochodzący z niego materiał został użyty m.in. do budowy kościoła oraz innych budynków w Nördlingen. Brekcję z krateru Rochechouart (Francja) wykorzystano do budowy średniowiecznego zamku w Rochechouart (Reimold i in., 2005), a z materiału pokolizyjnego z krateru Vredefort wzniesiono jeden z najbardziej znanych pomników w Republice Południowej Afryki – Voortrekker Monument – oraz międzynarodowe lotnisko w Johannesburgu (Reimold i in., 2005). Brekcja impaktowa z krateru Lappajärvi (Finlandia) posłużyła do budowy hotelu Kivittippu w Nykälänniemi, w którym utworzono również wystawę dotyczącą kolizji meteorytowych i utworzenia krateru Lappajärvi (Reimold i in., 2005).

Materiał poimpaktowy znajduje zastosowanie nie tylko w budownictwie. Brekcja z krateru Gardnos (Norwegia) i tektyty z Czech (mołdawity) są używane jako kamienie ozdobne do wyrobu biżuterii (Reimold i in., 2005).

Złożami syngenetycznymi mogą być też złoża diamentów, jeżeli przyjmiemy za m.in. Osinskim i Pierazzo (2013), że powstają one w wyniku wysokich ciśnień i temperatur generowanych podczas zderzenia bolidu z powierzchnią planety. Diamenty takie znajdują się np. w kraterach Popigaj w Rosji, Ries w Niemczech i Sudbury w Kanadzie (Osinski & Pierazzo, 2013).

Jako złoża syngenetyczne traktowane są również pokłady rud miedzi i niklu znajdujące się w kraterze Sudbury w Kanadzie. Są one uznawane za jedno z największych złóż z tej grupy. Ich wydobycie przynosiło w latach 90. XX w. dochody wysokości ok. 400 mln USD na rok (Westbroek & Stewart, 1996).

### Złoża epigenetyczne

Złoża epigenetyczne są najbardziej zróżnicowane, a jednocześnie wzbudzają najwięcej kontrowersji przy klasyfikacji. Wynika to z ich definicji, według której powstają w kraterze, ale nie są bezpośrednio związane z kolizją (Grieve, 2005).

Do tej definicji pasują wszelkie skały mające znaczenie ekonomiczne, które tworzą się w jeziorach kraterowych (np. wapienie), jak również złoża węglowodorów, które w sprzyjających warunkach geologicznych powstają

z nagromadzonej w kraterze materii organicznej. Złożami epigenetycznymi będą także złoża węglowodorów, które migrują i gromadzą się w spękanych skałach i brekcji zgromadzonej na dnie struktury impaktowej (Reimold i in., 2005).

Pod względem klasyfikacji problematyczne są natomiast złoża tworzące się m.in. w wyniku pokolizyjnych procesów hydrotermalnych. Czas ich powstania jest zgodny z definicją złóż epigenetycznych, ale sama energia ciepła jest powiązana z dwoma czynnikami: z przekształceniem energii kinetycznej bolidu w energię cieplną i z energią wnętrza ziemi uwalnianą nad będącą efektem kolizji płamą gorącą. Złoża powstające dzięki tej energii opisywane są jako epigenetyczne, choć wydaje się wątpliwe, czy jest to właściwa klasyfikacja, ze względu na genezę pierwszego źródła energii cieplnej. Być może dobrym rozwiązaniem byłoby podzielenie złóż epigenetycznych na złoża tektoniczno-termalne – związane z procesami uruchomionymi przez kolizję – i złoża strukturalne – utworzone jedynie w wyniku gromadzenia się osadów w kraterze.

Do złóż tektoniczno-termalnych zaliczałyby się wówczas m.in. pokłady rud, które powstały przed utworzeniem się krateru, ale zostały remobilizowane pod wpływem energii kolizji lub pokolizyjnej energii hydrotermalnej. Jednym z przykładów tego typu złóż mogą być rudy uranu wydobywane w kraterze Ternowka, gdzie poimpaktowa aktywność hydrotermalna wywołała remobilizację blendy uranowej i uformowanie się żył (Reimold i in., 2005). Natomiast epigenetyczne złoża węglowodorów, które utworzyły się w zagłębieniach pokolizyjnych, należałyby do złóż strukturalnych. Ich przykładem mogą być złoża znajdujące się m.in. w ukraińskich kraterach Bołtysz, Obołoń i Rotmistrowka. Są to złoża niedojrzałej ropy naftowej powstałej w izolowanych basenach. Ich zasoby szacowane są na 90 mln baryłek (Westbroek & Stewart, 1996).

Złoża węglowodorów, które zgromadziły się w zagłębieniach tektonicznych utworzonych w strukturach impaktowych, również należałyby do drugiej podgrupy złóż epigenetycznych. Znajdują się one m.in. w amerykańskich kraterach Red Wing (ok. 130 mln baryłek ropy i  $2,8 \times 10^9$  m<sup>3</sup> gazu ziemnego; Barton i in., 2010) i Avak (Westbroek & Stewart, 1996).

Oprócz tego istnieją kraterki, które łączą w sobie pułapkę dla węglowodorów (węglowodory migrują i gromadzą się w spękanych dnie krateru i wypełniającej krater brekcji) i ich pierwotne źródło – np. zlokalizowane w USA kraterki Ames (szacowane zasoby wynoszą tam 25 mln baryłek ropy i  $2,8 \times 10^9$  m<sup>3</sup> gazu ziemnego; Barton i in., 2010) i Newporte (Westbroek & Stewart, 1996; Reimold i in., 2005). Krater Newporte jest jednym z wyjątków od reguły mówiącej, że ekonomiczne złoża znajdują się w strukturach o średnicy powyżej 5 km. Jego średnica wynosi jedynie 3,2 km (Earth Impact Database, 2013).

Złożami strukturalnymi byłyby również tworzące się w niecce krateru zasoby wód mineralnych i rezerwuary wód pitnych, jak np. w kraterze Manson w USA, Kraterze Kałuskim w Rosji czy Vepriai na Litwie, a także wód powierzchniowych (również wykorzystywanych jako woda pitna) zgromadzonych w Kraterze Łohojskim na Białorusi oraz kraterach Manicouagan w Kanadzie i Bosumtwi w Ghanie (Reimold i in., 2005).

## INNE SPOSOBY WYKORZYSTANIA KRATERÓW METEORYTOWYCH

Zgromadzona w kraterze woda może być wykorzystywana również jako źródło energii elektrycznej, czego przykładem jest krater Manicouagan w Kanadzie. Wybudowanie w pobliżu krateru hydroelektrowni jest związane z dwoma czynnikami. Po pierwsze z istnieniem krateru, gdzie utworzyły się jeziora kraterowe będące źródłem wody dla rzek, na których powstały elektrownie. Po drugie z lokalizacją krateru na obszarze wyniesionym, co pozwoliło na spiętrzenie wody i zapewniło odpowiednią energię umożliwiającą napędzanie hydroelektrowni. Jezioro kraterowe zasila dwie rzeki (Manicouagan i Outardes), na których postawiono siedem zapór z elektrowniami wodnymi (Manic-1, Manic-2, Manic-3, Manic-5/Daniel-Johnson, Outardes-2, Outardes-3 i Outardes-4; Westbroek & Stewart, 1996).

Ekonomiczne wykorzystanie kraterów meteorytowych nie ogranicza się jedynie do wydobywania i użytkowania związanych z nimi złóż. Coraz częściej docenia się ich potencjał turystyczny. Młode i niezerodowane kraterki meteorytowe, w których utworzyły się jeziora, są idealnymi miejscami do odpoczynku i uprawiania sportów wodnych (kajakarstwo, żeglarstwo, wędkarstwo itp.), czego przykładem może być jezioro w kraterze Bosumtwi (Ghana) lub jezioro w kraterze Lappajärvi (Finlandia). Okolice kraterów są też dobrymi obszarami do uprawiania innych sportów oraz turystyki pieszej i rowerowej – jako przykłady mogą posłużyć trasa turystyczna do krateru Tswaing w RPA i trasa turystyczna w kraterze Houghton w Kanadzie. Ze względu na obecność otaczających kraterki wyniesień zbudowanych z wyrzuconej materii lub – w przypadku większych kraterów – obecność wyniesienia centralnego (jak np. w kraterze Gow w Kanadzie) i wyniesień ułożonych koncentrycznie (Clearwater West w Kanadzie) kraterki i ich otoczenie wykorzystywane są również jako urozmaicone trasy narciarskie, głównie do narciarstwa biegowego. Trasy takie znajdują się m.in. w kraterach Siljan i Dellen w Szwecji.

Struktury impaktowe są jednymi z najciekawszych geologicznych form na powierzchni Ziemi. Wiele z nich opisano i przystosowano do celów edukacyjnych. Powstały liczne muzea, w których można poznać geologię danego krateru i proces formowania się astrobleatów. Takimi obiektami edukacyjnymi są muzea w kraterze Tswaing w RPA, w pobliżu Krateru Meteorytowego w USA czy w kraterze Ries w Niemczech (muzeum poświęcone jest kraterom podwójnym Ries i Steinheim), a także trasa edukacyjno-joggingowa w kraterze Lappajärvi w Finlandii i geopark w kraterze Rochechouart we Francji (Reimold i in., 2005).

## PODSUMOWANIE

Wymienione przykłady dowodzą, że kraterki meteorytowe nie muszą być związane jedynie z katastrofami. Z punktu widzenia człowieka kolizje dużych obiektów pozaziemskich miały wiele pozytywnych następstw, a ich ekonomiczny potencjał jest nie do pominięcia, jeśli wziąć pod uwagę wyniki ostatnich badań związanych z poszukiwaniem złóż i surowców użytecznych ekonomicznie. Konieczne są zatem dalsze zakrojone na dużą skalę badania

nastawione na poszukiwanie struktur impaktowych. Szanse na sukces są ogromne, ponieważ jeżeli oszacowania dotyczące kraterów o potencjale ekonomicznym (czyli tych o średnicy powyżej 5 km) są prawidłowe, to ich liczba wynosi przeszło 10 000, a dotychczas odnaleziono niewiele ponad 100 takich struktur, co stanowi jedynie 1% (Glikson, 2001). Nawet jeżeli większość kraterów uległa zniszczeniu lub została pochłonięta w strefach subdukcji, to nadal jest możliwe odkrycie wielu pozostałych. Poszukiwania powinny być prowadzone zwłaszcza na obszarach słabo rozwiniętych, gdzie odnalezienie kraterów może mieć spore znaczenie ekonomiczne nie tylko z uwagi na potencjalne złoża, ale również ze względu na turystykę i coraz bardziej popularną geoturystykę. Rokowania wydają się pomyślne, gdyż co roku odkrywane są kolejne obiekty będące kraterami meteorytowymi – w ciągu ostatnich trzech lat do listy kraterów dopisano pięć struktur kolizyjnych (Carancas – Peru, Colônia – Brazylia, Luizi – Demokratyczna Republika Konga, Ritland – Norwegia i Tunnunik – Kanada; Earth Impact Database, 2013). Badania powinny obejmować również dalsze dokładne analizy skał w znanych kraterach i prowadzić do opracowania metod wydobycia zawartych w nich złóż.

Bardzo dziękuję recenzentom i redaktorowi naczelnemu za słusne uwagi, dzięki którym artykuł stał się pełniejszy i bardziej zrozumiały. Dziękuję również za pokazanie innego punktu widzenia dotyczącego zagadnień związanych z kolizjami kosmicznymi.

## LITERATURA

- BARTON R., BIRD K., HERNÁNDEZ J.G., GRAJALES-NISHIMURA J.M., MURILLO-MUÑETÓN G., HERBER B., WEIMER P., KOEBERL C., NEUMAIER M., SCHENK O. & STARK J. 2010 – High-impact reservoirs. *Oilfield Rev.*, 21(4): 14–29.
- BOOTH C. 2010 – Laboratory report: craters of the Moon. Technical Report. Univ. Dublin, Sch. Math., Dublin.
- Canadian Nuclear Safety Commission 2003 – Comprehensive study report for Cluff Lake Decommissioning Project [www.ceaa-acee.gc.ca/41B79974-docs/report\_e.pdf].
- COLLINS G.S., MELOSH H.J. & MARCUS R.A. 2005 – Earth impact effects program: a web-based computer program for calculating the regional environmental consequences of a meteoroid impact on Earth. *Meteorit. Planet. Sci.*, 40: 817–840.
- DASNOIS N. 2012 – Uranium mining in Africa: a continent at the centre of a global nuclear renaissance. *Occasional paper no 122*. SAIIA, Johannesburg: 1–32.
- Earth Impact Database 2013. PASSC, Dep. Earth Sci., Univ. New Brunswick, Canada [http://www.passc.net/EarthImpactDatabase].
- FRENCH B.M. 1998 – Traces of catastrophe. A handbook of shock-metamorphic effects in terrestrial meteorite impact structures. *Lunar Planet. Inst.*, Houston: 1–120.
- GLIKSON A.Y. 2001 – The astronomical connection of terrestrial evolution: crustal effects of post 3,8 Ga mega-impact clusters and evidence for major 3,2±0,1 Ga bombardment of the Earth-Moon system. *J. Geodyn.*, 32: 205–229.
- GRIEVE R.A.F. 2003 – Extraterrestrial triggers for resource deposits. *App. Earth Sci.*, 112(2): B145–B147.
- GRIEVE R.A.F. 2005 – Economic natural resource deposits at terrestrial impact structures. [W:] McDonald I. i in. (red.) *Mineral deposits and Earth evolution*. *Geol. Soc. Lond., Spec. Publ.*, 248:1–29.
- GRIEVE R.A.F. & MASAITIS V.L. 1994 – The economic potential of terrestrial impact craters. *Int. Geol. Rev.*, 36: 105–151.
- GROUSSIN O., A'HEARN M., BELTON M.J.S., FARNHAM T., FEAGA L., KISSEL J., LISSE C.M., MELOSH J., SCHULTZ P., SUNSHINE J. & VEVERKA J. 2010 – Energy balance of the deep impact experiment. *Icarus*, 205: 627–637.
- MARAKUSHEV A.A., LONGKANG S., ZHENDONG Y., ZOTOV I.A., PERTSEV N.N. & PANEYAKH N.A. 1998 – Genetic types of diamond mineralization. *Chin. J. Geochem.*, 17(1): 12–28.
- MASAITIS V.L. 1991 – Impact craters: are they useful? *Meteoritics*, 27: 21–27.
- MELOSH H.J. 1989 – Impact cratering: a geological process. *Oxford Monogr. Geol. Geophys.*, 11: 1–245.
- MELOSH H.J. & COLLINS G.S. 2005 – Planetary science: meteor crater formed by low-velocity impact. *Nature*, 434: 157.
- MONTMERLE T., AUGEREAU J.-C., CHAUSSIDON M., GOUNELLE M., MARTY B. & MORBIDELLI A. 2006 – Solar System formation and early evolution: the first 100 million years. *Earth, Moon and Planets*, 98: 39–95.
- MORBIDELLI A. 2005 – Origin and dynamical evolution of comets and their reservoirs. *Astrophysics* [http://arxiv.org/abs/astro-ph/0512256].
- OSINSKI G.R. & PIERAZZO E. 2013 – Impact cratering: processes and products. [W:] Osinski G.R. & Pierazzo E. (red.) *Impact cratering: processes and products*. Wiley-Blackwell, Chichester: 1–20.
- REIMOLD W.U. 1995 – Impact cratering – a review, with special reference to the economic importance of impact structures and the Southern African impact crater record. *Earth, Moon and Planets*, 70: 21–45.
- REIMOLD W.U., KOEBERL C., GIBSON R.L. & DRESSLER B.O. 2005 – Economic mineral deposits in impact structures: a review. [W:] Koeberl C. & Henkel H. (red.) *Impact tectonics, ser. Impact Studies*. Springer, Berlin–Heidelberg: 479–552.
- SCHULTZ P.H., EBERHARDY C.A., ERNST C.M., A'HEARN M.F., SUNSHINE J.M. & LISSE C.M. 2007 – The deep impact oblique cratering experiment. *Icarus*, 190(2, Supplement): 84–122.
- WESTBROEK H.-H. & STEWART R.R. 1996 – The formation, morphology, and economic potential of meteorite impact craters. *CREWES Res. Report*, 8: 34-1–34-26.

Praca wpłynęła do redakcji 24.05.2013 r.

Akceptowano do druku 18.02.2014 r.