

Janusz W. KOSINSKI¹

Wybuchowe kraterory meteorytowe

Explosive Craters of Meteorites

Abstract: The article contains the description of the most important features of explosive craters of meteorites.

Keywords: explosive craters of meteorites, shock changes, impactites

Wstęp

Udowodnienie, że istniejące dowolne zagłębienie w powierzchni Ziemi jest kraterem meteorytowym jest trudne, ale udowodnienie, że nie jest można uznać za niemal niemożliwe! Bo któż da nam 100% pewność, że zagłębienie, w swych początkach, ze spadkiem meteorytu i powstaniem krateru nie ma nic wspólnego? W ten sposób wszystkie dolki i całkiem spore depresje możemy uznać za potencjalne pozostałości kraterów, co sprawia, że badanie w celu stwierdzenia genezy danego obiektu mija się z celem – ostatecznego wyniku i tak nie osiągniemy... Czy na pewno? Oczywiście nie. Kraterory meteorytowe mają specyficzne cechy i ich występowanie pozwala nam powiedzieć: to jest (był) krater, nawet jeśli dzisiaj tego co nam się z kraterem kojarzy nie widać. Te same uwagi można również odnieść do innych obiektów, o mniej egzotycznym pochodzeniu.

Na Ziemię spada meteoroid

Meteoroidy poruszając się po różnych orbitach wokółsłonecznych mogą przecinać orbitę Ziemi i zderzać się z nią. Jeśli meteoroid będzie poruszał się dokładnie naprzeciw ruchowi Ziemi, to może wtargnąć w atmosferę z prędkością sięgającą ok. 72 km s^{-1} . W najbardziej sprzyjającej sytuacji, kiedy Ziemia i meteoroid poruszają się w tym samym kierunku, prędkość wejścia w atmosferę będzie dużo mniejsza, ale nigdy nie będzie to mniej niż $11,2 \text{ km s}^{-1}$, czyli tyle ile wynosi druga pręd-

¹ Wyszaków, meteorites@vp.pl

kość kosmiczna. Jest to prędkość, jaką uzyska ciało swobodnie opadające z przestrzeni kosmicznej na naszą planetę, przyspieszone jedynie przez jej pole grawitacyjne.

Przy prędkościach rzędu kilkudziesięciu kilometrów na sekundę, opór stawiany przez atmosferę jest tak duży, że w znakomitej większości przypadków z meteoroidów nie pozostaje prawie nic. W wyniku intensywnego tarcia rozgrzewają się, rozpylają i stają częścią atmosfery jako pył wielkości 10^{-5} – 10^{-4} cm. Po około 30 dniach pył ten osiada na powierzchni Ziemi i można spotkać go wszędzie (Kosinski 1993).

Jeśli jednak masa meteoroidu jest wystarczająco duża, a jego prędkość względem Ziemi nie przekracza pewnej granicy, ciało może dotrzeć do powierzchni planety. Prędkość graniczną, czyli taką przy której ciało ma szansę na zachowanie zintegrowanej postaci i znalezienie się przy powierzchni, oblicza się obecnie na $28 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ (Botke i inni 1994). W latach pięćdziesiątych XX w., gdy rozpoczęto kompleksowe badania spadków meteorytów, wartość ta obliczana była na $20 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ (Lewin 1950), jednak współczesne fotograficzne obserwacje bolidów pozwoliły uściślić tę wielkość na nieco wyższym poziomie.

Przedzierające się przez atmosferę ciało kosmiczne nie tylko traci materię, ale również jest intensywnie wyhamowywane. Przy powierzchni Ziemi prędkości mogą być rzędu 200 – $300 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Spadające ciało zderza się z podłożem i wybija w nim zagłębienie. Powstaje krater meteorytowy o charakterze uderzeniowym. Jeśli natomiast prędkość jest większa od $4 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ przy zetknięciu ciała z powierzchnią Ziemi następuje wybuch i powstaje krater meteorytowy o charakterze wybuchowym (Krinov 1955). Przedrzeć się przez atmosferę i zachować znaczną prędkość mają szanse ciała o dużych masach – w czasie przemieszczania się przez atmosferę meteoroid zmniejsza swą masę o przeciętnie dwa rzędy wielkości. Pomijając szczegóły dotyczące dynamiki przelotu przez atmosferę, można przyjąć, że szanse na utworzenie krateru wybuchowego mają tylko ciała o znacznej masie, szacowanej na, co najmniej, kilkanaście ton i prędkościach rzędu 5 – $10 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ przy powierzchni Ziemi (French 1998).

W momencie zetknięcia ciała z powierzchnią Ziemi, jego energia kinetyczna gwałtownie zmienia się w energię cieplną, powstaje olbrzymie ciśnienie i fala uderzeniowa. Materia podłoża i meteorytu są rozrzucone wokół miejsca zderzenia a częściowo odparowane.

Powstawanie kraterów meteorytowych wybuchowych

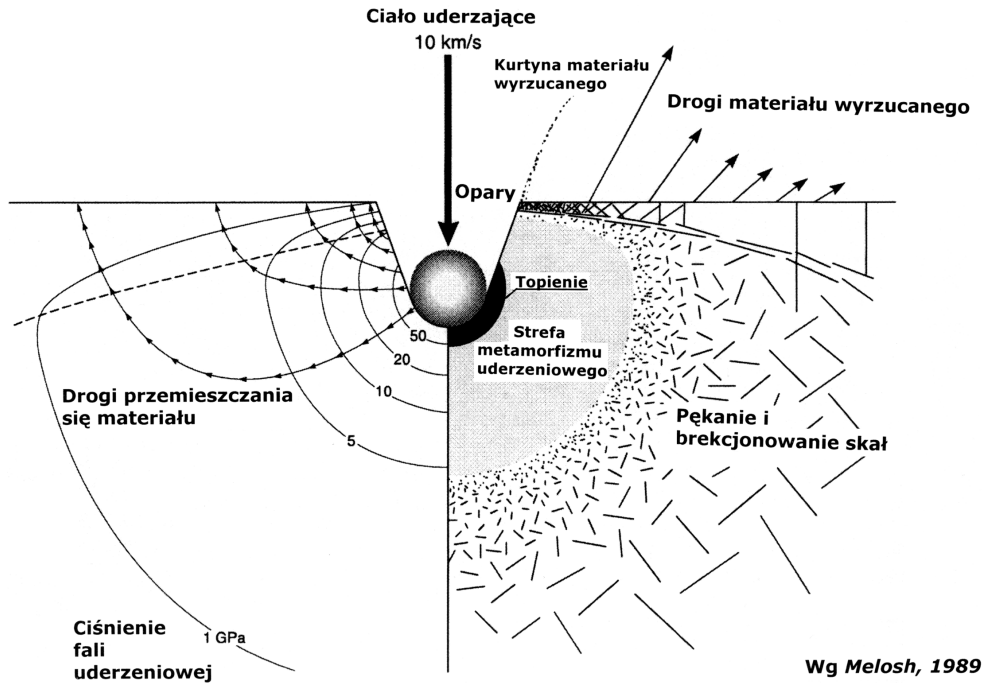
Powyższy obraz jest bardzo skrótowy – dla lepszego przybliżenia cech takiego krateru, przyjrzyjmy się jego powstaniu nieco dokładniej.

W momencie zetknięcia się ciała meteoroidu z powierzchnią Ziemi, w miejscu zderzenia wytworzone zostaje ogromne ciśnienie (rzędu kilkudziesięciu MPa lub większe). Skutkiem tego ciśnienia jest powstanie fali uderzeniowej rozchodzącej się sferycznie zarówno pod powierzchnią planety, jak i w uderzającym ciele. Energia kinetyczna poruszającego się meteoroidu gwałtownie zamieniona zostaje w energię

cieplną. Powoduje to odparowanie, topienie i rozkruszanie się materii zderzających się ciał. Materiał ten przy bardzo wysokim ciśnieniu i znacznej temperaturze, zostaje wyrzucony we wszystkie strony: są to fragmenty podłoża, fragmenty uderzającego ciała, gorący gaz.

Fala uderzeniowa przechodząca przez meteoroid powoduje jego silną deformację, a w wielu przypadkach całkowite zniszczenie.

Natomiast fala uderzeniowa poruszająca się w podłożu radialnie od punktu uderzenia, powoduje odrzucanie materiału w strefie wysokich ciśnień i przekształcenie jego struktury w strefie ciśnień średnich i niskich. Schemat tego procesu przedstawia rycina 1.

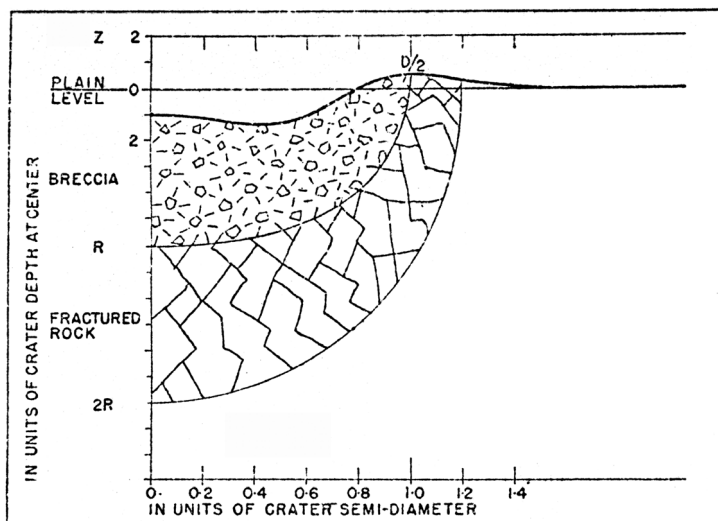


Ryc. 1. Powstawanie krateru meteorytowego wybuchowego – efekty uderzenia: fala uderzeniowa i strefy przekształceń (wg Melosh 1989; zmienione)

Większość energii ujawnionej w całym zjawisku „zużywana” jest na wyrzucenie materiału. Fala uderzeniowa wdzierając się w głąb podłoża powoduje (dla R oznaczającego promień krateru):

- do $0,05 R$ – odparowanie skał
- do $0,07 R$ – zmetamorfizowanie szokowe skał
- do R – powstanie brekcji i wymieszanie skał
- do $2 R$ – skruszenie skał, ślady w strukturze skał

Końcowy efekt działania fali uderzeniowej przedstawia rycina 2.



Ryc. 2. Efekty działania fali uderzeniowej w skali promienia krateru (Beals i inni 1963)

Cechy kraterów meteorytowych wybuchowych

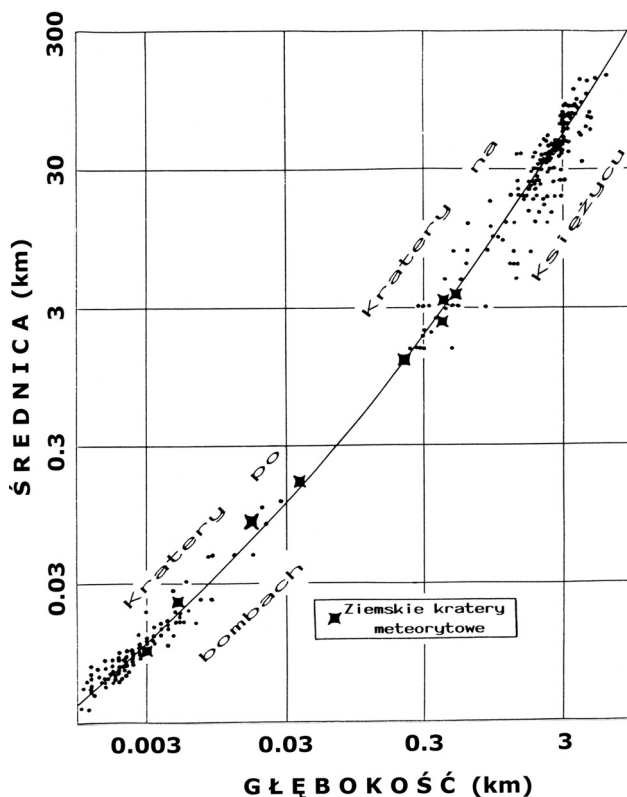
Powstawanie kraterów meteorytowych o charakterze wybuchowym w dużej mierze przypomina skutki eksplozji znaczącego ładunku materiałów wybuchowych. Już w latach pięćdziesiątych XX w. zauważono analogię pomiędzy procesem kraterotwórczym a wybuchem ładunku jądrowego (Mark 1995), a w latach sześćdziesiątych przeprowadzono serię eksperymentalnych wybuchów, w czasie których badano przebieg procesu powstawania kraterów (Hansen 1968) i jego cechy (rycina 3).

Na podstawie tych eksperymentów oraz prac badawczych w znanych kraterach meteorytowych, ustalonych zostało kilka cech charakterystycznych kraterów meteorytowych wybuchowych. Najważniejsze z nich:

1. **budowa geologiczna krateru:** warstwy skalne podłoża są co najmniej zaburzone, a w przypadku większych obiektów przetopione, zbrekcyjne, zlitfikowane, przemieszczone, spękanne. Wokół zagłębienia występuje wał wyrzuconego materiału wykazującego cechy metamorficzne;

2. **budowa geomorfologiczna:** krater jest formą wklęsło-wypukłą; w centrum jest zagłębienie, wokół teren jest wyższy niż średni poziom gruntu. Zaburzony jest naturalny układ warstw skalnych, a więc również występują specyficzne cechy hydrologiczne. Proporcje pomiędzy średnicą a głębokością w kraterach są stałe w momencie powstania (bez uwzględnienia erozji niszczącej zarówno nieckę krateru, jak i wały). Proporcje średnica-głębokość dla kraterów różnego typu pokazuje rycina 4.

Krater wybuchowy ma zawsze okrągłą formę, niezależnie od kąta pod jakim uderza spadające ciało – fala uderzeniowa rozchodzi się sferycznie (kuliście). Również wał krateru jest symetryczny – materia wyrzucana jest we wszystkich kierun-



Ryc. 4. Zależność pomiędzy średnicą a głębokością w kraterach (wg Beals i inni 1963; zmienione)

przykład w kraterach Wabar (Półwysep Arabski), w 1 cm^3 szkliva kwarcowego ilość kuleczek żelazowo-niklowych dochodzi do 2 milionów (Spencer 1933);

5. **zmiana budowy minerałów:** ogromne ciśnienia wywołane wybuchem powodują zmiany struktury minerałów. I tak, przy ciśnieniach rzędu 11 GPa, w kwarcu pojawiają się planarne struktury deformacyjne (PDFs), przy ciśnieniach rzędu 12–15 GPa, kwarc przekształca się w stizowit a grafit w diament, natomiast powyżej 30 GPa, kwarc przekształca się w coesyt (French 1998). Struktury określane jako PDFs obserwowane są również w oliwinach, plagioklazach i piroksenach (Norton 2002);

6. **powstawanie specyficznych cech geofizycznych:** anomalii grawitacyjnych, zaburzenia pola magnetycznego, zmiany charakterystyk sejsmicznych (Gurow 2002).

Podsumowanie

Badając obiekt podejrzewany o genezę meteorytową należy uwzględnić występowanie przynajmniej części z powyższych cech. Nie wszystkie muszą występować jednocześnie – wiele zależy od wielkości obiektu (warunków początkowych jego powstania).

Jako przykład występowania efektów zjawiska uderzenia meteorytu w powierzchnię Ziemi, niech posłuży krater o średnicy 250 m.

W kraterze o średnicy 250 m będą występowały zarówno zmiany charakterystyczne dla metamorfizmu uderzeniowego, jak również impaktyty. Wynika to z ilości energii wydzielonej w czasie wybuchu.

Zależność pomiędzy średnicą krateru a energią konieczną do jego wytworzenia, w uproszczony sposób można przedstawić następującą formułą:

$$\log D = 0,3284 \log E - 7,9249$$

gdzie: D – średnica wyrażona w km

E – energia wyrażona w ergach [1 erg = 10⁻⁷ J] (Beals 1965)

W przypadku krateru o średnicy 250 m, energia potrzebna do jego utworzenia wynosi ok. 1,99·10¹⁵ J. Ślady uderzenia będą widoczne w podłożu nawet do 500 m od centrum krateru. W samym kraterze, przy takiej ilości wydzielonej energii powstaną brekcje i szkliwa. Na przykład w największym ze wspomnianych kraterów Wabar znajdowane są szkliwa, impaktyty i lityfikacje, podczas gdy jego średnica wynosi ok. 100 m i powstał w podłożu piaszczystym. W procesie powstawania kraterów o średnicach rzędu 200–300 m, ciśnienia liczone są już w GPa, co oznacza, że ślady uderzenia zostaną zapisane tak w zaburzeniach układu warstw skalnych, jak również w strukturze minerałów. Meteoroid rzeczywiście może nie przetrwać tak gwałtownych procesów, ale jego ślad w postaci pyłu meteorytowego będzie łatwo zauważalnym elementem wśród innych impaktytów.

Literatura

- Beals C.S., Innes M.J.S., Rottenberg J.A., 1963. Fossil Meteorite Craters (in:) *The Solar System*: 235–284.
- Beals C.S., 1965. The Identification of ancient craters. *Contributions from the Dominion Observatory Ottawa* 6(25).
- Bottke W., Nolan M., Greenberg R., Kolvoord R., 1994. Collisional lifetimes and impact statistics of near-Earth asteroids (in:) *Hazards due to comets and asteroids*: 337–357.
- Deutsch A., Schäfer U., 1994. Dating terrestrial impact events. *Meteoritics* 29: 301–322.
- French B.M., 1998. Traces of Catastrophe.
- Gurov E.P., 2002. Импактное кратерообразование на поверхности Земли. *Геофизический журнал – Geophysical journal* 24(6): 3–35.
- Hansen S.M., 1968. A Crater Formed by Gas Erosion of a Nuclear Explosion Vent. *Meteoritics* 4: 61–87.
- Kosinski J., 1993. Poradnik obserwatora meteorów.
- Krinow E., 1955. Meteoryty olbrzymy.
- Lewin B., 1950. Некоторые вопросы движения метеорных тел в атмосфере Земли. *МЕТЕОРИТИКА – Meteoritika* 7: 113–124.
- Mark K., 1995. Meteorite Craters.
- Melosh H.J., 1989. Impact Cratering: A Geologic Process.
- Norton O.R., 2002. The Cambridge Encyclopedia of Meteorites.
- Spencer L.J., 1933. Meteoric Iron and Silica-glass from the Meteorite Craters of Henbury (Central Australia) and Wabar (Arabia). *Mineralogical Magazine* 13(142): 386–404.