

Meteoryty, kratery uderzeniowe i inne ślady kosmicznej katastrofy w rejonie Moraska pod Poznaniem

Witold Szczuciński¹, Andrzej Muszyński¹



W. Szczuciński

A. Muszyński

Meteorites, impact craters, and other traces of a cosmic disaster at Morasko near Poznań.
Prz. Geol., 68: 637–644.

Abstract. About 5,000 years ago near Morasko (the district of the present-day city of Poznań, western Poland) the largest known iron meteorite shower in Central Europe took place. The evidence of that impact, documented so far, comprises numerous iron meteorite fragments distributed over an area of approximately 3 km² and at least six meteorite impact craters with a maximum diameter of about 100 m. The present paper reviews the most recent findings related to the meteorite, craters, processes of their formation, as well as the environmental effects of the impact in the Morasko area. The most important findings, reported in this review cover: 1) the recognition of two new minerals in the meteorite: moraskoite and czochralskiite; 2) the identification and detailed analysis of the ejecta layer around the craters and underlying paleosoil providing evidence for the mid-Holocene age of the impact; 3) the numerical modelling constraining the range of likely physical properties of the impactor, e.g. the diameter of the projectile forming the largest crater and its landing velocity (c. 1.5 m and 10 km/s, respectively); 4) the studies of the nearby lake and peat deposits revealing restricted environmental effects of the impact. The Morasko craters field is currently one of the best-studied examples of small/moderate-sized meteorite impact in unconsolidated sediments.

Keywords: impact crater, meteorite, ejecta deposits, Holocene, Poland

Powierzchnie Merkurego, Marsa czy krążącego wokół Ziemi Księżyca są naznaczone licznymi kraterami uderzeniowymi. Jednak dopiero w ciągu kilku ostatnich dekad procesy związane z impaktami meteorytów, komet i planetoid w powierzchnie planet i księżyców (*impact cratering*) zostały uznane za jedne z najpowszechniejszych procesów geologicznych w naszym Układzie Słonecznym (Melosh, 1989; Osinski, Pierazzo, 2013). O tym, że i Ziemia podlega nieustannemu, kosmicznemu bombardowaniu, przypominają nam zarówno zdarzenia historyczne, jak i ślady geologiczne. Ostatni znaczący upadek meteorytu (meteorytami nazywamy fragmenty meteoroidów, które dolatują do powierzchni ciał niebieskich), nastąpił 15.02.2013 r., kiedy to w okolicach Czelabińska, nad obszarem zamieszkanym przez ponad milion osób, podczas przelotu meteoroidu przez atmosferę powstała fala uderzeniowa, w wyniku której zostało rannych ok. 1500 osób i zanotowano zniszczenia ok. 7200 budynków (Popova i in., 2013). Było to największe zdarzenie tego typu od czasu katastrofy tunguskiej w 1908 r., która spowodowała między innymi powalenie tajgi w promieniu ok. 40 km (ryc. 1B).

W przeszłości rozmiary kosmicznych katastrof na Ziemi były jednak o wiele większe. Świadczą o tym geologiczne ślady – kratery uderzeniowe i zachowane w skałach struktury impaktowe, których średnice dochodzą nawet do 180 km (Chicxulub). Baza danych *Impact Crater Database* (2020) zawiera listę ok. 200 potwierdzonych struktur impaktowych (ryc. 2). Nie jest to jednak wiele, na przykład w porównaniu z liczbą kraterów na dużo przecież mniejszym Księżycu, gdzie samych kraterów o średnicy >20 km naliczono 5185 (Head i in., 2010). Ta różnica wynika głównie z aktywnego zachodzenia na Ziemi procesów tektonicznych, erozji i sedymentacji, które skutecznie niszczą bądź maskują struktury uderzeniowe. Większość znanych kraterów i struktur impaktowych na Ziemi to duże (>1 km

i stosunkowo stare (>1 mln lat) obiekty (ryc. 2). Nie odpowiada to znanym zależnościom, wskazującym, że częstotliwość zderzeń z mniejszymi obiektami jest zdecydowanie większa. Szacuje się, że meteoryty żelazne o kilkumetrowej średnicy, które tworzą kratery o średnicy ~100 m, mogą uderzać w obszary lądowe Ziemi nawet częściej niż raz na 500 lat (Bland, Artemieva, 2006). Paradoksalnie, znamy zaledwie ok. 25 udokumentowanych kraterów o średnicy <1 km (Schmieder, Kring, 2020; ryc. 2). Są to między innymi kratery w Estonii (Losiak i in., 2016, 2020b), Kanadzie (Herd i in., 2008), Peru (Kenkmann i in., 2009) i w... Polsce, w pobliżu Poznania (ryc. 1).

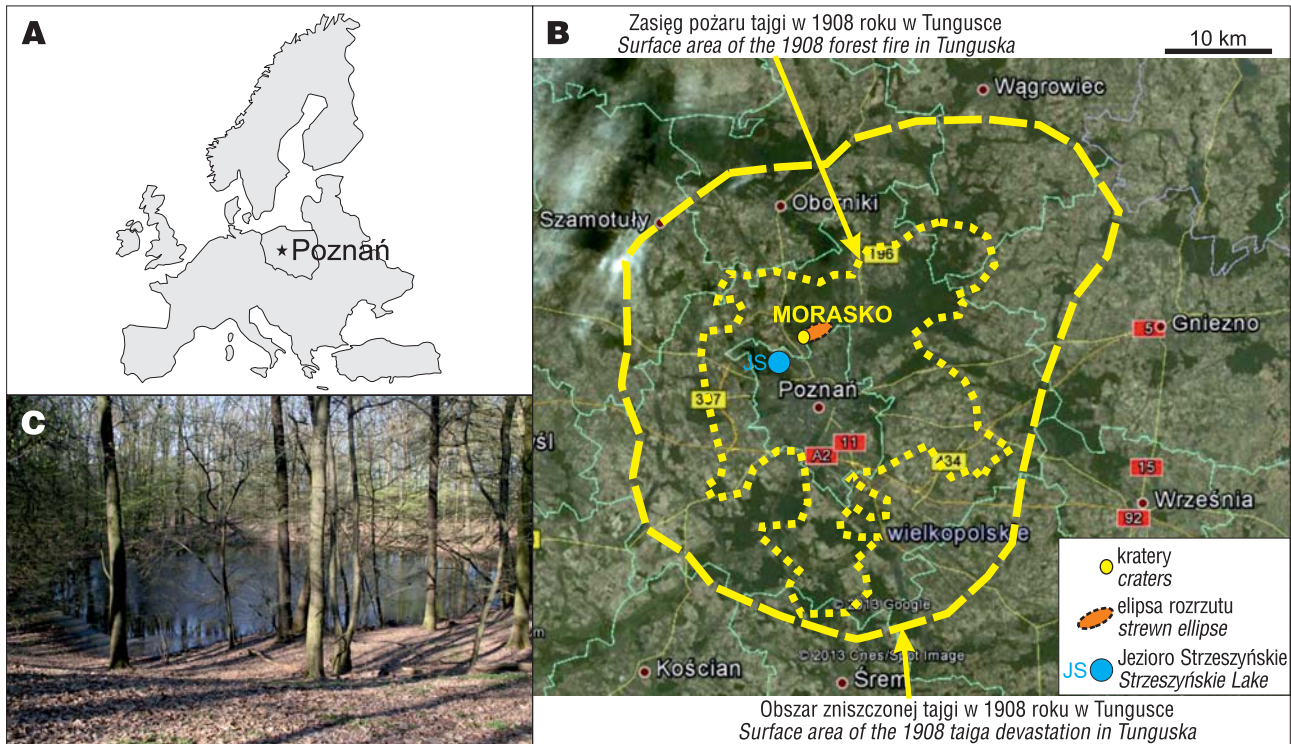
Liczne znaleziska meteorytów żelaznych i zespół kraterów uderzeniowych w pobliżu wsi Morasko, która obecnie znajduje się w granicach administracyjnych Poznania, są uważane za miejsce największego udokumentowanego deszczu meteorytów żelaznych w Europie Środkowej (Muszyński i in., 2012). Historia badań meteorytu Morasko sięga roku 1914, kiedy to dr Cobliner natknął się na pierwsze okazy tego meteorytu podczas kopania okopów wojskowych. Ich masy wynosiły 77,5 kg; 4,2 kg i dwie sztuki po 3,5 kg każdy. Do tej pory udokumentowano ponad 2000 kg materii meteorytu Morasko, składającego się z odłamków o wadze od kilku gramów do ponad 270 kg. W rezerwacie Meteoryt Morasko oprócz meteorytów występują również zagłębienia o średnicy do 100 m. Pokrzywnicki (1964) zinterpretował je jako kratery uderzeniowe. Obecność pozaziemskiego materiału metalicznego i morfologiczne skutki jego upadku sprawiają, że Morasko jest jednym z zaledwie kilkunastu takich udokumentowanych miejsc na Ziemi.

Wyjątkowość Moraska, nie tylko w skali krajowej (jest to jedyna udokumentowana struktura impaktowa w Polsce), ale i światowej (jedno z kilkunastu miejsc z dobrze zachowanymi efektami małego lub też średniego impaktu),

¹ Instytut Geologii, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Uniwersytet im. A. Mickiewicza w Poznaniu, ul. B. Krygowskiego 12, 60-680 Poznań; witek@amu.edu.pl; annu@amu.edu.pl

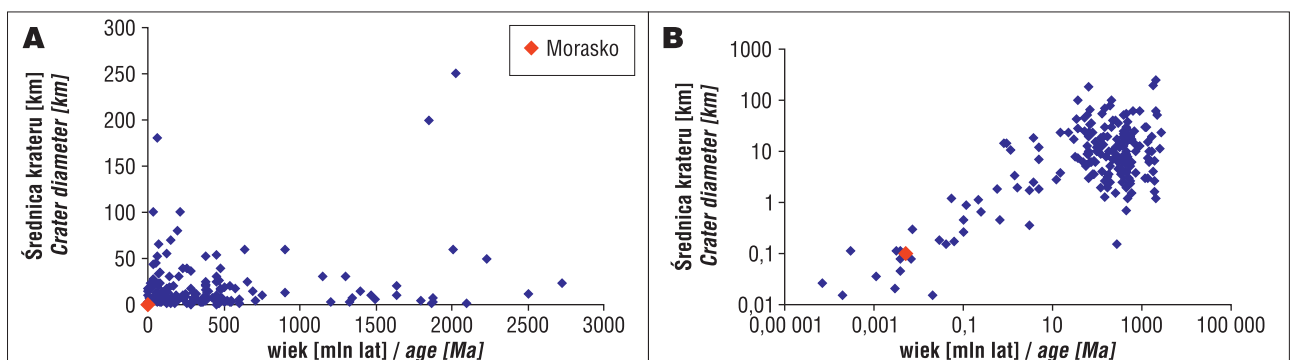
ma swoje odzwierciedlenie również w dużym zainteresowaniu badaczy. Według bazy *Scopus* meteoryty i krateru na Morasku oraz powiązane z nimi zagadnienia badawcze były przedmiotem 45 recenzowanych prac (stan na lipiec 2020 r.) oraz co najmniej takiej samej liczby prac rozproszonych w wydawnictwach polskojęzycznych i pokonferencyjnych. Istnieje też wiele wcześniejszych publikacji,

prezentujących podsumowania stanu wiedzy o meteorycie Morasko i historii jego impaktu, na przykład klasyczne już artykuły Pokrzywnickiego (1955, 1964) i Hurnika (1976), czy nowsze opracowania autorstwa Stankowskiego (2008) oraz Muszyńskiego i innych (2012). Ponadto wiele interesujących informacji i aktualną bibliografię tematu można znaleźć na stronach wiki.meteorica.pl.



Ryc. 1. Miejsce upadku meteorytu Morasko: **A** – lokalizacja Poznania na tle Europy; **B** – okolice Poznania (mapa *Google Earth*) z zaznaczonym rejonem upadku meteorytu Morasko, elipsą rozrzutu (wg Bronikowskiej, 2018b) i pobliskim Jeziorem Strzeszyńskim. W celu zobrazowania hipotetycznej skali możliwych zniszczeń dla porównania narysowano zasięg pożaru oraz zniszczeń tajgi w wyniku impaktu nad Tunguską w 1908 r. (wg Vasilyeva, 1998), uznając krateru na Morasku za pozostałość po impakcie; **C** – największy z kraterów uderzeniowych na Morasku, którego obecna średnica wynosi 96,5 m (Włodarski i in., 2017)

Fig. 1. The fall site of the Morasko meteorite: **A** – location of Poznań in Europe; **B** – the surroundings of Poznań (from *Google Earth*) with the Morasko meteorite impact site, its strewn ellipse (after Bronikowska 2018b), and nearby Strzeszyńskie Lake marked. To visualize the hypothetical scale of possible damage, the ranges of wildfire and taiga devastation as a result of the Tunguska impact in 1908 are superimposed (after Vasilyev, 1998), assuming the Morasko craters to be the impact site; **C** – the largest of the impact craters in Morasko, with the current diameter of 96.5 m (Włodarski et al., 2017)



Ryc. 2. Zestawienie średnicy i szacowanego wieku udokumentowanych struktur impaktowych na Ziemi (wg Schmieder, Kring, 2020). Większość to duże struktury, 1–100 km średnicy, które powstały dziesiątki do setek milionów lat temu. Na czerwono zaznaczony jest największy krater na Morasku, stosunkowo niewielki i młody w porównaniu do większości znanych struktur: **A** – w skali liniowej; **B** – w skali logarytmicznej

Fig. 2. Summary of the diameters and estimated ages of documented impact structures on Earth (data from Schmieder, Kring, 2020). Most of them are large structures, 1–100 km in diameter, which were formed tens to hundreds of millions of years ago. The largest crater in Morasko is marked in red, it is relatively small and young compared to most known structures: **A** – on linear scale; **B** – on logarithmic scale

Niniejszy artykuł, chociażby ze względu na ograniczoną objętość, nie może pretendować do miana kompletnego przeglądu stanu wiedzy na temat impaktu Morasko. Nie podejmujemy w nim również debaty z opiniami odbiegającymi od powszechnie akceptowanej interpretacji o impaktowej genezie kraterów (np. Czajka, 2015; Walesiak, 2017). Krytyczna analiza takich opinii, osadzona na gruncie fizyki procesów związanych z impaktami, została niedawno zaprezentowana przez Bronikowską (2018a). Celem tego artykułu jest zrelacjonowanie aktualnego stanu badań nad meteoritem Morasko, miejscem jego upadku oraz skutkami, a także przedstawienie szerszemu gronu czytelników niezwyklej osobliwości geologicznej Wielkopolski i jej znaczenia – nie tylko jako lokalnej ciekawostki geologicznej, ale również w aktualnych międzynarodowych badaniach planetarnych. Zaznaczyliśmy także niektóre kierunki prowadzonych obecnie badań i otwarte pytania.

ZARYS GEOLOGII OBSZARU MORASKA

Z geologicznego punktu widzenia obszar Moraska jest atrakcyjny nie tylko ze względu na meteoryty i krater (ryc. 1). Jest to pas moren polodowcowych, których obecna forma powstała ok. 18,5 tys. lat temu w fazie poznańskiej (faza frankfurcka) ostatniego zlodowacenia (Karczewski, 1976; Kozarski, 1995; Chmal, 1990; Stankowski, 2001, 2008; Pacanowski i in., 2016). Budulcem tych moren są głównie późnoplejstocenyjskie osady glacialne i fluwioglacjalne – gliny, piaski i żwiry – oraz zdeformowane glaci-tektonicznie iły neogeńskie tzw. formacji poznańskiej, które miejscami są widoczne na powierzchni. Deformacje glaci-tektoniczne rozwinęły się prawdopodobnie już podczas starszych zlodowaceń (Chmal, 1990; Stankowski, 2008). Najwyższym wzniesieniem jest Góra Moraska (154 m n.p.m.), a wysokości względne okolicznych wzniesień terenu sięgają nawet ponad 50 m. W sąsiedztwie moren powstało również wiele obniżen z wytopienia bloków martwego lodu, wypełniających niegdyś rynny lodowcowe lub porzebanych w osadach lodowcowych (Stankowski, 2008). W niektórych z nich znajdują się obecnie jeziora o różnych kształtach i rozmiarach, wypełnione osadami jeziornymi osiagającymi miąższość od kilku do kilkunastu metrów (Pleskot, 2019; Pleskot i in., 2018).

METEORYT MORASKO

Meteoryty są bardzo cennym źródłem informacji o budowie planet w Układzie Słonecznym i ich ewolucji. Dotyczy to również meteoritu Morasko, którego badania wnoszą wiedzę nie tylko na temat jego właściwości i historii upadku, ale również odnośnie budowy wewnętrznej ciał planetarnych. Od 1914 r., czyli roku znalezienia pierwszego fragmentu meteoritu Morasko, zebrano tysiące fragmentów tego meteoritu w obszarze tak zwanej elipsy rozrzutu (Muszyński i in., 2012; Bronikowska 2018b). Meteoryty te mają wagę od kilku gram po 271,8 kg i stały się przedmiotem szczegółowych badań mineralogicznych i geochemicznych (np. Pokrzywnicki, 1964; Dominik, 1976; Buchwald, 1977; Muszyński i in., 2012; Piłski i in., 2013). Meteorit Morasko to meteorit żelazny o spójnym składzie chemicznym i mineralnym (ryc. 3), co sugeruje, że znajduwane okazy pochodzą z rozpadu pojedynczego meteoroidu. Meteorit Morasko pod względem struktury należy do grupy oktaedrytów gruboziarnistych i zawiera

średnio 7% Ni i 93% Fe (Muszyński i in., 2012). Pod względem klasyfikacji chemicznej należy do grupy meteorytów żelaznych IAB MG. Meteorit Morasko składa się głównie z minerałów kamacytu i taenitu (stopy Fe i Ni) oraz sporadycznie występujących cohenitu i schreibersytu (węglík i fosforek Fe i Ni). Istotną cechą są inkluzje w meteorycie, zwane nodulami, mające zwykle 1–2,5 cm średnicy (ryc. 3B). Składają się one z grafitu i troilitu (siarczku Fe), z niewielką ilością krzemianów, tlenków i fosforanów. W rejonie Moraska są również powszechnie prowadzone poszukiwania sferul metalicznych i mikrometeorytów (np. Dworzyńska, Muszyński, 2012).

Do grona najbardziej intrygujących odkryć ostatnich lat należy niewątpliwie zaliczyć rozpoznanie w meteorycie Morasko – przez Karwowskiego i innych (2015, 2016) – dwóch nowych minerałów, niespotykanych w ziemskich skałach. Są to moraskoit ($\text{Na}_2\text{Mg}(\text{PO}_4)\text{F}$) i czochralskiit ($\text{Na}_4\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{PO}_4)_4$) – mikroskopijnych rozmiarów fosforany znalezione w nodulach grafitowo-troilitowych. Ich nazwy nawiązują do wsi Morasko, od której przyjęła się nazwa meteoritu i rezerwatu przyrody, gdzie znajdują się krater, oraz do wybitnego chemika, metaloznawcy i wy-nalazcy – Jana Czochralskiego.

Kolejnym wątkiem badań meteoritu Morasko, podjętym w ostatnich latach, są badania zewnętrznych partii jego odłamków, czyli tzw. skorupy. Z jednej strony meteoryty te podlegają procesom wietrzenia, z drugiej jednak mają w niektórych przypadkach zachowane deformacje i zmiany mineralogiczne wynikające z impaktu w podłożu (Duczmal-Czernikiewicz, Michalska, 2018).

KRATERY

Koliste, śródleśne zagłębienia (ryc. 1C) jako pierwszy połączył z ich impaktową genezą Pokrzywnicki (1964). Jednak zarówno jego obserwacje, wspomagane ekspertyzami Krygowskiego i Stankowskiego (Pokrzywnicki, 1964), jak i późniejsze, bardziej szczegółowe, badania Karczewskiego (1976) i jego studentów nie doprowadziły do jednoznacznych konkluzji odnośnie genezy zagłębien. Przyczyna tkwiła z jednej strony w złożonej budowie geologicznej, pozostawionej przez lądolód (zdeformowana glaci-tektonicznie strefa marginalna), z drugiej zaś była związana z brakiem klarownych kryteriów umożliwiających identyfikację małych struktur impaktowych – rozwój badań nad nimi miał dopiero nadejść. French i Koeberl (2010) w swoim przeglądzie kryteriów struktur impaktowych podają, że w przeciwieństwie do dużych struktur z wyraźnymi śladami metamorfizmu szokowego, identyfikacja mniejszych form często musi być oparta na wielu przesłankach kontekstualnych.

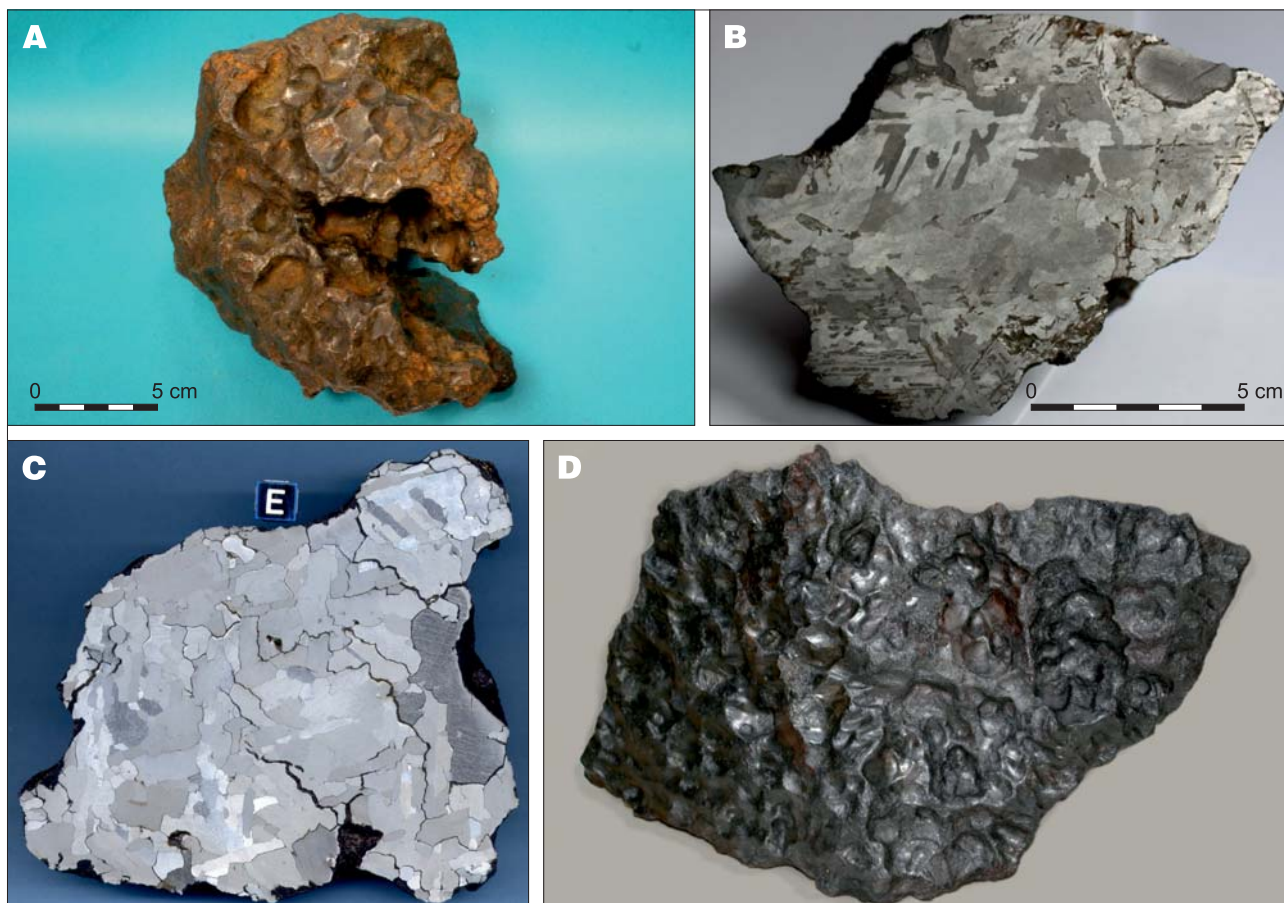
Interpretacja genezy kraterów na Morasku wynika z wielu przesłanek. Pierwotnie były one interpretowane jako krater, głównie ze względu na ich kształt (ryc. 4), powszechnie współwystępujące meteoryty oraz wiek. Datowania palinologiczne (Tobolski, 1976), radiowęglowe (Stankowski, 2001, 2008) czy termoluminescencyjne (Stankowski i in., 2007) wskazywały bowiem, że początek akumulacji w zagłębieniach nastąpił w środkowym holocenie (ok. 5000–5500 lat temu), zatem znacznie później niż by się tego należało spodziewać w przypadku ich polodowcowej genezy. Niemniej brak jednoznacznie zidentyfikowanych efektów metamorfizmu szokowego, np. kwarcu szokowego, czy różnowiekowy początek akumulacji w poszczególnych kraterach rzucały cień niepewności na ich

impaktową genezę, zwłaszcza że zagłębienia o kulistym kształcie mogą być również efektem innych procesów, w tym glacialnych i termokrasowych (np. Błaszkiwicz, Danel, 2019). Z czasem jednak argumentów na impaktową genezę przybywało, np. usytuowanie kraterów w stosunku do elipsy rozrzutu meteorytów. Wiele nowych kluczowych wskazówek przyniosły badania z ostatnich kilku lat.

Jednym z ważnych pomocniczych kryteriów identyfikujących kraterory impaktowe jest ich morfologia. Włodarski i in. (2017) przeprowadzili bardzo detaliczne pomiary geodezyjne na terenie rezerwatu Meteoryt Morasko (ryc. 4), gdzie obecnie znajduje się przynajmniej 6 kraterów. Ich liczba krótko po powstaniu mogła być większa, lecz z czasem ulegały one degradacji. Kraterory mają obecnie średnicę od 29,6 do 96,5 m i są niemalże idealnie kuliste – stosunek najdłuższej do najkrótszej średnicy waha się między 1,03 a 1,1. Jedynie jedna mała forma jest bardziej wydłużona (siódme zagłębienie – D na ryc. 4), co być może jest efektem połączenia ze sobą dwóch bardzo blisko siebie utworzonych małych kraterów. Średnia głębokość kraterów wynosi między 1,2 a 12,1 m, a nowe sondowania i profilowania georadarowe dna kraterów świadczą o tym, że miąższość wypełniających je osadów organicznych sięga

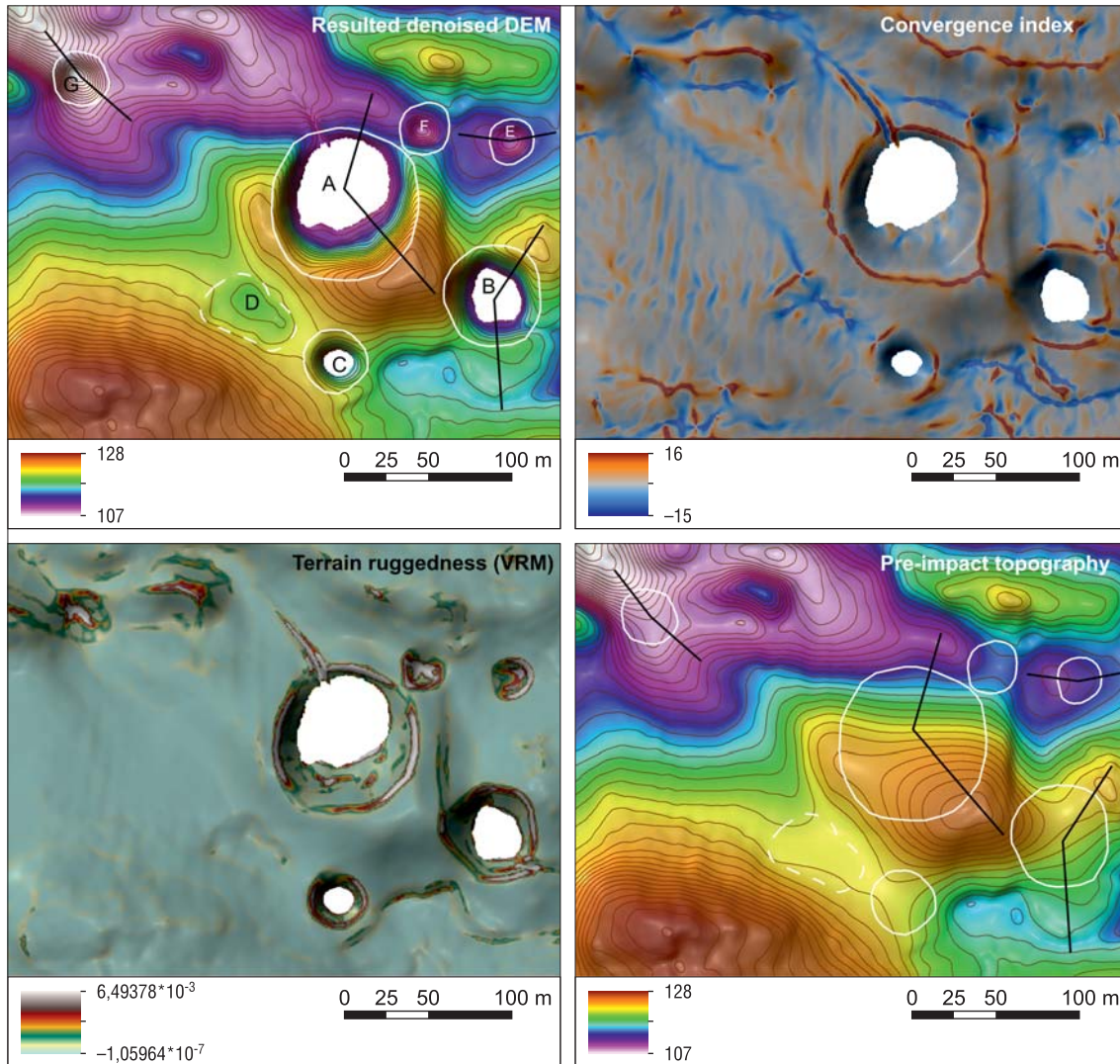
nawet 4 m (Choiński i in., 2019). Wcześniejsze obserwacje morfologii kraterów zwracały uwagę na asymetrię ich obrzeżeń, np. w przypadku największego krateru, którego południowa krawędź jest zdecydowanie wyższa niż północna (ryc. 4). Nie brano jednak pod uwagę pierwotnej rzeźby terenu. Włodarski i in. (2017) przeprowadzili interpolację przedimpaktowej powierzchni terenu (ryc. 4), która nawiązuje do lokalnego systemu grzbietów i zagłębień morenowych. Wiele z cech uznawanych wcześniej za nieregularności kraterów (np. wspomniana asymetria największego krateru) wynika z tego, że ostateczna forma kraterów powstała na skutek nałożenia ich na pierwotną rzeźbę; część z nich powstała na stokach, inne zaś w już istniejących zagłębieniach.

Powstanie krateru wiąże się również z wyrzuceniem materiału skalnego poza jego obręb. Takie osady, zdeponowane dookoła kraterów, są nazywane zwykle *ejecta deposits*. Wcześniejsze badania nie wykazały jednoznacznie ich obecności. Wynikało to między innymi z tego, że mogą one bardzo przypominać pierwotne osady (w tym wypadku np. gliny lodowcowe). Najnowsze badania ujawniły jednak obecność osadów wyrzuczonych z kraterów, które przykrywają zachowaną miejscami dawną glebę (paleoglebę, ryc. 5).



Ryc. 3. Meteoryt Morasko: **A** – okaz o wadze 2,5 kg z widocznymi regmagliptami i pierwotną skorupą obtopieniową; **B** i **C** – przekłady przeciętych meteorytów z wytrawionymi powierzchniami, widoczne są figury Widmanstättena i pojedyncze owalne nodule troilitowo-grafitowe (oba okazy mają ok. 15 cm szerokości); **D** – drugi co do wielkości okaz meteorytu Morasko (Memross – 261,2 kg, obwód 2 m) z widocznymi regmagliptami. Jest on eksponowany w Muzeum Ziemi Wydziału Nauk Geograficznych i Geologicznych Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu (<http://muzeumziemi.amu.edu.pl/>)

Fig. 3. Meteorite Morasko: **A** – a 2.5 kg specimen of the Morasko meteorite with visible regmaglypts and fusion crust; **B** and **C** – Examples of cut meteorites with etched surfaces, the Widmanstätten patterns and single globular troilite-graphite nodules are visible (both specimens are about 15 cm wide); **D** – the second largest specimen of the Morasko meteorite (Memross – 261.2 kg, circumference 2 m) with regmaglypts, which is on display at the Museum of the Earth of the Faculty of Geographical and Geological Sciences of Adam Mickiewicz University in Poznań (<http://muzeumziemi.amu.edu.pl/>)



Ryc. 4. Cyfrowy model wysokościowy (DEM) kraterów na Morasku oraz niektóre z jego pochodnych atrybutów topograficznych – zbieżność zboczy (*convergence index*) i nierówności terenu (*VRM*) – a także zrekonstruowana topografia sprzed impaktu (*pre-impact topography*). Poziomice są co 5 m. Białe linie wyznaczają przybliżone granice kraterów uderzeniowych (wg Włodarskiego i in., 2017; numer licencji udzielonej przez Elsevier na wykorzystanie ryciny: 4873991332517)

Fig. 4. Final DEM and some of its derivative topographic attributes (slope convergence and terrain ruggedness), as well as reconstructed pre-impact topography. DEM and pre-impact topography are contoured at 5-m intervals. White lines mark boundaries of impact craters (after Włodarski et al., 2017; licence number of copyright agreement with Elsevier for reusing the figure: 4873991332517)

Wiek tej gleby wynosi 5000–6400 kalibrowanych lat BP (Szczuciński i in., 2016). Zatem pokrywa się z wiekiem (4800–5400 kalibrowanych lat BP) najstarszych osadów organicznych wypełniających krater (Stankowski, 2008). Zasięg, miąższość i typy osadów wyrzuconych z kraterów zostały szczegółowo zbadane przez Szokaluk i in. (2019) na podstawie ponad 300 nowych wierceń oraz analizy wkopów. Osady te mają zwykle postać polimodalnych diamiktonów zawierających nieregularne klasty ilów neogeńskich. Takie osady są również określane terminem brekcja impaktowa (*impact breccia*). Ich miąższość sięga maksymalnie ok. 2 m i maleje z odległością od krateru. Miejscami jest pod nimi zachowana dawna gleba, ewentualnie są w nich zachowane niewielkie fragmenty (0,5–2,5 cm) węgielków drzewnych. Ponadto w pobliżu krawędzi krateru udokumentowano też sekwencje osadów, które mają zachowaną odwróconą oryginalną kolejność stratygraficzną, tj. na paleogłębce leżą kolejno osady fluwio-glacial-

ne, lodowcowe i na samej górze najstarsze ły neogeńskie (ryc. 5). Dalsze badania geofizyczne, sedimentologiczne, mineralogiczne (np. Duczmal-Czernikiewicz, Muszyński, 2015) i geotechniczne są w toku.

MODELOWANIE

Wbijanie się meteorytu w grunt można co prawda porównać do wrzucenia kamyczka do piaskownicy, jednak proces powstawania kraterów uderzeniowych jest o wiele bardziej skomplikowany. Podczas impaktu zachodzą procesy indukowane hipersoniczną prędkością ($\gg 1$ km/s), z jaką spada meteoryt. Dużą rolę w tym procesie odgrywa ogromna różnica ciśnień, powstająca przed meteoroidem, spadającym zwykle z prędkością 20–25 km/s, i za nim, generująca falę uderzeniową, która może utworzyć krater. W warunkach laboratoryjnych (np. Kenkmann i in., 2018) jedynie małe obiekty udaje się rozpedzić do prędkości



Ryc. 5. Zdjęcie ściany wkopu w pobliżu krawędzi krateru Morasko, ukazujące dolną część grubej na prawie 2 m warstwy osadów wyrzuconych z krateru (*ejecta*). Są to głównie iły neogénskie oraz diamiktony z klastami tychże ilów, które pokrywają starsze osady piaszczyste z rozwiniętym ciekim poziomem glebowym (*paleogleba*). Wiek *paleogleby* został oszacowany na ok. 5000–6400 kalibrowanych lat BP (Szczuciński i in., 2016) i pokrywa się z wiekiem najstarszych osadów organogenicznych wypełniających krater (Stankowski, 2008)

Fig. 5. A photo of the trench wall near the Morasko crater rim showing the lower part of the c. 2 m thick layer of ejecta deposits. They are composed mainly of Neogene clays and diamicton with clay clasts, and they cover older sandy sediments with a thin soil horizon (*paleosol*). The age of the *paleosol* was estimated at circa 5,000–6,400 calibrated years BP (Szczuciński et al., 2016) and is in line with the oldest ages of organogenic sediment filling the crater (Stankowski, 2008)

ponad 1 km/s. Doświadczenia tego typu są bardzo potrzebne, jednak szczególnego znaczenia nabierają eksperymenty numeryczne, umożliwiające symulowanie znacznie większych prędkości i różnych warunków granicznych. W ostatnich dekadach obserwujemy ogromny postęp w tej dziedzinie badań (np. Collins i in., 2013).

Do analizy upadku meteorytu Morasko, w tym do oszacowania parametrów wejściowych w atmosferę, zmian w trakcie przelotu przez atmosferę (oraz fragmentacji pierwotnego meteoroidu), rozkładu fragmentów meteorytu na ziemi, a także procesu formowania kraterów, nowoczesne metody modelowania zastosowała Bronikowska i in. (2017). Wyniki tych badań zostały pozytywnie zweryfikowane przez porównanie z rezultatami badań terenowych. Autorzy wnioskowali między innymi, że meteoroid miał

pierwotnie masę rzędu 600–1100 t i wpadł w atmosferę z prędkością między 16 a 18 km/s. Podczas przelotu przez atmosferę doszło do przynajmniej jednej fragmentacji, w wyniku której powstał deszcz meteorytów. Największy z odłamków, mający ok. 1,5 m średnicy, uderzył w ziemię z prędkością ok. 10 km/s, tworząc największy z kraterów. Modelowanie pozwoliło też oszacować, że oddziaływanie wysokiej temperatury było zapewne bardzo krótkie, a wysokie ciśnienie (>5 GPa), które mogło doprowadzić do powstania struktur szokowych w minerałach, oddziaływało tylko na bardzo niewielką objętość osadów, rozrzuconych następnie w promieniu kilkuset metrów.

SKUTKI ŚRODOWISKOWE IMPAKTU

Czy upadek meteorytu Morasko spowodował lokalną lub regionalną katastrofę? Czy zasięg zniszczeń mógł być podobny do znanego np. z katastrofy tunguskiej w 1908 r. (ryc. 1B)?

Impakty dużych planetoid nie tylko tworzą krater, ale często powodują również pożary, potężne fale uderzeniowe, trzęsienia ziemi, tsunami, a nawet zmiany klimatyczne (Osinski, Pierazzo, 2013). Okres 5000–5500 lat BP, kiedy doszło do powstania kraterów na Morasku, to początek neolitu w Wielkopolsce (Wierzbicki, 2013), stąd oczywiście brak jest historycznych opisów jakichkolwiek skutków tego zdarzenia. W odległości zaledwie kilku km od kraterów znajduje się natomiast kilka jezior polodowcowych, w których w ciągu tysięcy lat gromadziły się osady oraz szczątki roślin i zwierząt, co umożliwiło podjęcie badań nad zmianami środowiskowymi na tym obszarze, w tym nad oceną skutków impaktu na Morasku (Szczuciński i in., 2016; Pleskot i in., 2018; Pleskot, 2019).

Uzyskane dotychczas wyniki badań wskazują, że skutki impaktu były znacznie mniejsze, niż można by się spodziewać, a zasięg katastrofy prawdopodobnie ograniczał się do najbliższego otoczenia kraterów. Na przykład w jeziorze Strzeszyńskim, usytuowanym ok. 5,5 km od kraterów (ryc. 1B), wśród badanych parametrów (geochemia, sedimentologia, analiza pyłkowa), jedynym wskaźnikiem wykazującym wyraźną zmienność w okresie korespondującym z upadkiem meteorytu Morasko jest podwyższona podatność magnetyczna osadów jeziornych (ryc. 6; Pleskot i in., 2018). W innych okolicznych jeziorach, dotąd badanych (Kierskim, Glinnowieckim), nie ma jednoznacznego zapisu spodziewanych znacznych zmian środowiskowych czy pożarów (Szczuciński i in., 2016; Pleskot, 2019). Te wyniki są zgodne z wnioskami płynącymi z symulacji numerycznych, że fala uderzeniowa, która powstała w atmosferze podczas fragmentacji meteoroidu na znacznej wysokości, nie miała znaczącego wpływu na powierzchnię ziemi, a wysokie temperatury, jakie wytworzyły się podczas formowania kraterów, były zapewne zbyt krótkotrwałe, by zainicjować rozległe pożary (Bronikowska i in., 2017).

O potencjalnym wpływie impaktu na Morasku na kulturę neolityczną wspominał Wierzbicki (2013). Brak jednak dotychczas odpowiednich danych, które pozwoliłyby na jednoznaczną weryfikację tych przypuszczeń.

WNIOSKI I PYTANIA

Meteoryt Morasko i miejsce jego upadku wraz z zachowanymi kraterami uderzeniowymi stanowią niezwykle intrygującą osobliwość geologiczną nie tylko na skale Wielkopolski, ale również w skali światowej. Rzucając

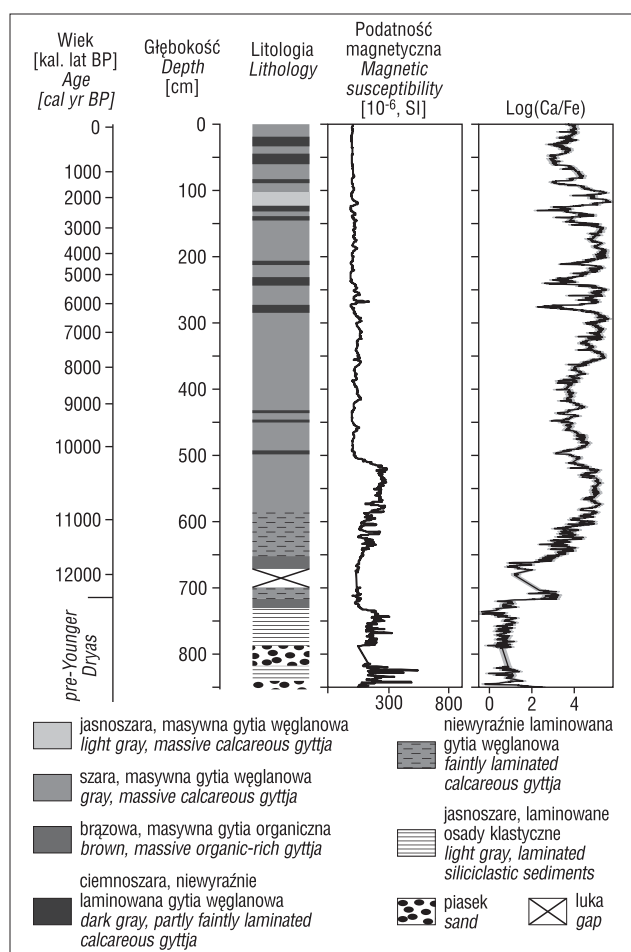
światło na jeden z najpowszechniejszych procesów kształtujących powierzchnie planet skalistych – uderzenia meteorytów i planetoid. Obecnie krater na Morasku i ich otoczenie należą do najdokładniej i najwszechstronniej przebadanych małych struktur impaktowych na Ziemi. Dotychczas rozpoznano ich stosunkowo niewiele (ryc. 2), ale być może dzięki najnowszym badaniom na Morasku uda się uszczegółowić kryteria identyfikacji takich niewielkich struktur i rozpoznać dotychczas nieznaną krater, których może być nawet kilkaset (Hergarten, Kenkmann, 2015).

Jak to w nauce, nowe odpowiedzi przywodzą nowe pytania, stąd też nic dziwnego, że kolejne badania w rejonie Moraska są w toku, a wiele pytań jest nadal otwartych. W kontekście poszukiwań wskaźników typowych dla małych struktur impaktowych są prowadzone między innymi intrygujące badania węgielków zawartych w osadach wyrzuconych z kraterów (Łosiak i in., 2020a) oraz badania geotechniczne mające na celu określenie, czy i na ile impakt wpłynął na konsolidację gruntów (Smaga i in., 2016). Poszukiwane są też potencjalne anomalie magnetyczne w rejonie upadku meteorytu. Nieustannie trwają poszukiwania kolejnych fragmentów meteorytów, prowadzone głównie przez kolekcjonerów. Trwają dyskusje i badania nad przyczynami podobieństw w składzie meteorytu znalezionego w Przelazach pod Świebodzinem (ok. 100 km na zachód od Poznania) i meteorytu Morasko. Kontynuowane są prace nad uszczegółowieniem czasu upadku meteorytu Morasko, jego skutków i możliwych reakcji lokalnych społeczności. Uzyskane już wyniki i planowane badania, mają szansę nie tylko dać odpowiedź na to, co wydarzyło się przed około 5000 lat w rejonie obecnego Poznania, ale również wyposażą nas w niezbędną wiedzę o zagrożeniach mogących wystąpić w przyszłości. W ramach programu NEO (*Near-Earth Objects*) nieustannie są monitorowane obiekty krążące w przestrzeni kosmicznej w pobliżu Ziemi. Mamy bowiem świadomość, że wcześniej czy później kolejne meteoroidy, planetoidy i komety będą uderzały w Ziemię, a badania przebiegu i skutków impaktów z przeszłości mogą nam dać realne wyobrażenie, czego należy oczekiwać w przyszłości.

Autorzy wyrażają serdeczne podziękowania zespołowi projektowemu, zwłaszcza Nataszy Artemiejewej, Małgorzacie Bronikowskiej, Robertowi Jagodzińskiemu, Mirosławowi Makohonieniec, Krzysztofowi Pleskotowi, Monice Szokaluk, Wojciechowi Włodarskiemu i Kaiowi Wünnemanowi, za owocną współpracę i liczne cenne dyskusje. Autorzy dziękują również Annie Łosiak i Grzegorzowi Rachlewiczowi za cenne uwagi wyrażone w recenzjach. Artykuł powstał w ramach realizacji projektu finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki nr 2013/09/B/ST10/01666.

LITERATURA

- BLAND P.A., ARTEMIEVA N.A. 2006 – The rate of small impacts on Earth. *Meteoritics & Planetary Sci.*, 41: 607–631.
- BLĄSZKIEWICZ M., DANIEL W. 2019 – Formy pierścieniowe w rejonie Wejherowa jako prawdopodobne pozostałości po-pingo i ich znaczenie dla paleogeografii późnego glacjału w północnej Polsce. *Prz. Geogr.*, 91: 405–419.
- BRONIKOWSKA M. 2018a – Jak powstały Krater Morasko? Rewizja istniejących poglądów dotyczących genezy zagłębień w rezerwacie pod Poznaniem. *Acta Soc. Meteorit. Polon., Roczn. Pol. Tow. Meteorytowego*, 9: 30–41.
- BRONIKOWSKA M. 2018b – Kierunek przylotu oraz parametry fizyczne meteoroidu Morasko wraz z ich implikacjami dla elipsy rozrzutu – wnioski z badań numerycznych. *Acta Soc. Meteorit. Polon., Roczn. Pol. Tow. Meteorytowego*, 9: 17–29.
- BRONIKOWSKA M., ARTEMIEVA N.A., WUNNEMANN K. 2017 – Reconstruction of the Morasko meteoroid impact – Insight from numerical modeling. *Meteoritics & Planetary Sci.*, 52 (8): 1704–1721.
- BUCHWALD V.F. 1977 – The mineralogy of iron meteorites. *Philosoph. Trans. Royal Soc. London*, A286: 453–491.
- CHMAL R. 1990 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, arkusz Poznań z objaśnieniami. Państw. Inst. Geol. -PIB.
- CHOIŃSKI A., MUSZYŃSKI A., PTAK M., SŁOWIK M. 2019 – Reconstruction of the primary bottom of a unique crater lake in the “Meteorite Morasko Reserve” (Poland). *Bull. Geogr. Phys. Geogr. Series*, 17: 5–16.
- COLLINS G.S., WUNNEMANN K., ARTEMIEVA N., PIERAZZO E. 2013 – Numerical modelling of impact processes. [W:] Osinski G.R., Pierazzo E. (red.), *Impact Cratering: Proc. Prod. Wiley-Blackwell*: 254–270.
- CZAJKA W. 2015 – Mechanizm tworzenia się zagłębień bezodpływowych na morenie moraskiej, tak zwanych „kraterów meteorytowych”. *Meteorit.*, 93 (1): 20–25.
- DOMINIK B. 1976 – Mineralogical and chemical study of coarse octahedrite Morasko. *Pr. Min. PAN*, 47: 7–53.
- DUCZMAL-CZERNIKIEWICZ A., MICHALSKA D. 2018 – Mineralogy and microstructure of the Morasko meteorite crust. *Planetary and Space Sci.*, 164: 44–53.



Ryc. 6. Litologia, podatność magnetyczna i geochemia (stosunek Ca/Fe uzyskany z pomiarów skanerem XRF) osadów Jeziora Strzeszyńskiego, oddalonego o ok. 5,5 km od kraterów uderzeniowych na Morasku (wg Pleskot i in., 2018). Korespondujące ze sobą zmiany w litologii i geochemii są interpretowane jako skutek zmian poziomu wód w jeziorze. Wzrost wartości podatności magnetycznej w środkowym holocenie czasowo odpowiada upadkowi meteorytu Morasko

Fig. 6. Lithology, magnetic susceptibility and geochemistry (Ca/Fe ratio from XRF scanning) of deposits from Lake Strzeszyńskie – the lake is c. 5.5 km from the Morasko crater field (after Pleskot et al., 2018). The correlated changes in lithology and geochemistry are interpreted as a record of lake water-level fluctuations. The increase in magnetic susceptibility in the middle Holocene corresponds to the timing of Morasko meteorite fall

- DUCZMAL-CZERNIKIEWICZ A., MUSZYŃSKI A. 2015 – Mineralogia drobnociąstek utworów z krateru Meteoryt Morasko. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 464: 17–24.
- DWORZYŃSKA M., MUSZYŃSKI A. 2012 – Co mówią wyniki badań mikrometeorytów z rezerwatu Meteoryt „Morasko”? *Acta Soc. Meteorit. Polon.*, 3: 155–156.
- FRENCH B.M., KOEBERL C. 2010 – The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn't, and why. *Earth-Science Rev.*, 98: 123–170.
- HEAD J.W., FASSETT C.I., KADISH S.J., SMITH D.E., ZUBER M.T., NEUMANN G.A., MAZARICO E. 2010 – Global distribution of large lunar craters: Implications for resurfacing and impactor populations. *Science*, 329: 1504–1507.
- HERD C.D.K., FROESE D.G., WALTON E.L., KOFMAN R.S., HERD E.P.K., DUKE M.J.M. 2008 – Anatomy of a young impact event in central Alberta, Canada: Prospects for the missing Holocene impact record. *Geology*, 36: 955–958.
- HERGARTEN S., KENKMANN T. 2015 – The number of impact craters on Earth: Any room for further discoveries? *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 425: 187–192.
<http://wiki.meteoritica.pl/index.php5/Morasko>
- HURNIK H. (red.) 1976 – Meteorite Morasko and the region of its fall. *Ser. Astronomia*, vol. 2. Wyd. Nauk. Univ. im. A. Mickiewicza, Poznań.
- IMPACT CRATER DATABASE 2020 – <https://impact.uwo.ca/>
- KARCZEWSKI A. 1976 – Morphology and lithology of closed depression area located on the northern slope of Morasko Hill near Poznań. [W:] Hurnik H. (red.), Meteorite Morasko and the Region of Its Fall. *Seria Astronomia*, vol. 2. Adam Mickiewicz University Press, Poznań: 7–20.
- KARWOWSKI Ł., KRYZA R., MUSZYŃSKI A., KUSZ J., HELIOS K., DROŻDŻEWSKI P., GALUSKIN E.V. 2016 – Czochralskiite, $\text{Na}_2\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{PO}_4)_4$, a second new mineral from the Morasko IAB-MG iron meteorite (Poland). *European J. Miner.*, 28: 969–977.
- KARWOWSKI Ł., KUSZ J., MUSZYŃSKI A., KRYZA R., SITARZ M., GALUSKIN E.V. 2015 – Moraskoite, $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{PO}_4)\text{F}$, a new mineral from the Morasko IAB-MG iron meteorite (Poland). *Miner. Mag.*, 79: 387–398.
- KENKMANN T., ARTMIEVA N.A., WÜNNEMANN K., POELCHAU M.H., ELBENHAUSEN D., NÚÑEZ DEL PRADO H. 2009 – The Carancas meteorite impact crater, Peru: Geologic surveying and modeling of crater formation and atmospheric passage. *Meteoritics & Planetary Sci.*, 44: 985–1000.
- KENKMANN T., DEUTSCH A., THOMA K., EBERT M., POELCHAU M.H., BUHL E., CARL E.R., DANILEWSKY A.N., DRESEN G., DUFRESNE A., DURR N., EHM L., GROSSE C., GULDE M., GÜLDEMEISTER N., HAMANN C., HECHT L., HIERMAIER S., HOERTH T., KOWITZ A., LANGENHORST F., LEXOW B., LIERMANN H.P., LUTHER R., MANSFELD U., MOSER D., RAITH M., REIMOLD W.U., SAUER M., SCHÄFER F., SCHMITT R.T., SOMMER F., WILK J., WINKLER R., WÜNNEMANN K. 2018 – Experimental impact cratering: A summary of the major results of the MEMIN research unit. *Meteoritics & Planetary Sci.*, 53: 1543–1568.
- KOZARSKI S. 1995 – Deglacjacja północno-zachodniej Polski: warunki środowiska i transformacja ekosystemu (ok. 20 KA–10 KA BP). *Dokumentacja Geograficzna I. Continuo*, Wrocław.
- LOSIK A., BELCHER C.M., PLADO J., HERD C., KOFMAN R., SZOKALUK M., SZCZUCIŃSKI W., MUSZYŃSKI A. 2020a – Using charcoal formed during an asteroid collision to recognize small impact craters on Earth and to learn about energy distribution around such features. 51st Lunar and Planetary Science Conference, held 16–20 March, 2020 at The Woodlands, Texas. *LPI Contribution No. 2326*, 2020, id.1934.
- LOSIK A., JÖELEHT A., PLADO J., SZYSZKA M., KIRSIMÄE K., WILD E.M., STEIER P., BELCHER C.M., JAZWA A.M., HELDE R. 2020b – Determining the age and possibility for an extraterrestrial impact formation mechanism of the Ilumetsa structures (Estonia). *Meteoritics & Planetary Sci.*, 55: 274–293.
- LOSIK A., WILD E.M., GEPPERT W.D., HUBER M.S., JOELEHT A., KRISKA A., KULKOV A., PAAVEL K., PIRKOVIC I., PLADO J., STEIER P., VALJA R., WILK J., WISNIEWSKI T., ZANETTI M. 2016 – Dating a small impact crater: An age of Kaali crater (Estonia) based on charcoal emplaced within proximal ejecta. *Meteoritics & Planetary Sci.*, 51: 681–695.
- MELOSH H.J. 1989 – *Impact Cratering: A Geologic Process*. Oxford University Press, New York.
- MUSZYŃSKI A., KRYZA R., KARWOWSKI Ł., PILSKI A.S., MUSZYŃSKA J. (red.) 2012 – Morasko. Największy deszcz meteorytów żelaznych w Europie środkowej. *Stud. Pr. Geogr. Geol.*, 28, Bogucki Wyd. Nauk., Poznań.
- OSINSKI G.R., PIERAZZO E. (red.) 2013 – *Impact cratering: processes and products*. Wiley-Blackwell.
- PACANOWSKI G., SOKOŁOWSKA M., MIESZKOWSKI R. 2016 – Rola obrazowania elektrooporowego w uszczegółowieniu skomplikowanej budowy geologicznej wzgórze Morasko w Poznaniu. *Prz. Geol.*, 64 (4): 238–244.
- PILSKI A.S., WASSON J.T., MUSZYŃSKI A., KRYZA R., KARWOWSKI Ł., NOWAK M. 2013 – Low-Ir IAB irons from Morasko and other locations in central Europe: One fall, possibly distinct from IAB-MG. *Meteoritics & Planetary Sci.*, 48: 2531–2541.
- PLESKOT K. 2019 – Holocenne zmiany środowiska okolic Poznania (środkowa Wielkopolska) w świetle badań paleolimnologicznych jezior: Strzeszyńskiego, Kierskiego i Glinnowieckiego. *Rozpr. dokt., Univ. im. A. Mickiewicza, Poznań*.
- PLESKOT K., TJALLINGII R., MAKOHONIENKO M., NOWACZYK N., SZCZUCIŃSKI W. 2018 – Holocene paleohydrological reconstruction of Lake Strzeszyńskie (western Poland) and its implications for the central European climatic transition zone. *J. Paleolim.*, 59 (4): 443–459.
- POKRZYWNICKI J. 1955 – O niektórych mało znanych polskich meteorytach. *Acta Geol. Pol.*, 5: 427–438.
- POKRZYWNICKI J. 1964 – I. Meteority Polski. II. Katalog meteorytów w zbiorach polskich. *Stud. Geol. Polon.*, 15: 9–140.
- POPOVA O.P., JENNISKENS P., EMELYANENKO V., KARTASHOVA A., BIRYUKOVA E., KHAIBRAKHMANOV S., SHUVALOV V., RYBNOV Y., DUDOROV A., GROKHOVSKY V.I., BADYUKOV D.D., YIN Q.Z., GURAL P.S., ALBERS J., GRANVIK M., EVERS L.G., KUIPER J., KHARLAMOV V., SOLOVYOV A., RUSAKOV Y.S., KOROTKIY S., SERDYUK I., KOROCHANTSEV A.V., LARIONOV M.Y., GLAZACHEV D., MAYER A.E., GISLER G., GLADKOVSKY S.V., WIMPENNY J., SANBORN M.E., YAMAKAWA A., VEROSUB K.L., ROWLAND D.J., ROESKE S., BOTTO N.W., FRIEDRICH J.M., ZOLENSKY M.E., LE L., ROSS D., ZIEGLER K., NAKAMURA T., AHN I., LEE J.I., ZHOU Q., LI X.H., LI Q.L., LIU Y., TANG G.Q., HIROI T., SEARS D., WEINSTEIN I.A., VOKHMINTSEV A.S., ISHCHENKO A.V., SCHMITT-KOPPLIN P., HERTKORN N., NAGAO K., HABA M.K., KOMATSU M., MIKOUCHI T. 2013 – Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. *Science*, 342: 1069–1073.
- SCHMIEDER M., KRING D.A. 2020 – Earth's impact events through geologic time: a list of recommended ages for terrestrial impact structures and deposits. *Astrobiology*, 20: 91–141.
- SMAGA A., RADASZEWSKI R., WIERZBICKI J. 2016 – On the Possible Influence of Small Impact on Geoengineering Properties of Subsoil. 79th Annual Meeting of the Meteoritical Society, held 7–12 August, 2016 in Berlin, Germany. *LPI Contribution No. 1921*, id.6142.
- STANKOWSKI W.T.J. 2001 – The geology and morphology of the natural reserve “Meteoryt Morasko”. *Planetary and Space Sci.*, 49: 749–753.
- STANKOWSKI W. 2008 – Meteoryt Morasko osobliwość obszaru Poznania. *Wyd. Nauk. UAM, Poznań*.
- STANKOWSKI W., RAUKAS A., BLUSZCZ A., FEDOROWICZ S. 2007 – Luminescence dating of the Morasko (Poland), Kaali, Ilumetsa and Tsöörimäe (Estonia) meteorite craters. *Geochronometria*, 28: 25–29.
- SZCZUCIŃSKI W., PLESKOT K., MAKOHONIENKO M., TJALLINGII R., APOLINARSKA K., CERBIN S., GOSLAR T., NOWACZYK N., RZODKIEWICZ M., SŁOWIŃSKI M., WOSZCZYK M., BRAUER A. 2016 – Environmental Effects of Small Meteorite Impact in Unconsolidated Sediments – Case of Iron Meteorite Shower in Morasko, Poland. 79th Annual Meeting of the Meteoritical Society, held 7–12 August, 2016 in Berlin, Germany. *LPI Contribution No. 1921*, id.6433.
- SZCZUCIŃSKI W., SZOKALUK M., BRONIKOWSKA M., JAGODZIŃSKI R., MUSZYŃSKI A., WÜNNEMANN K. 2016 – Identification and dating of small impact crater ejecta deposits, case of Morasko craters, Poland. 32nd IAS International Meeting of Sedimentology, 2016, Marrakech, Morocco: 296.
- SZOKALUK M., JAGODZIŃSKI R., MUSZYŃSKI A., SZCZUCIŃSKI W. 2019 – Geology of the Morasko craters, Poznań, Poland – Small impact craters in unconsolidated sediments. *Meteoritics & Planetary Sci.*, 54 (7): 1478–1494.
- TOBOLSKI K. 1976 – Palynological investigations of bottom sediments in closed depressions. [W:] Hurnik H. (red.), Meteorite Morasko and the Region of Its Fall. *Seria Astronomia*, vol. 2. Adam Mickiewicz Univ. Press, Poznań: 21–26.
- VASILYEV N.V. 1998 – The Tunguska Meteorite problem today. *Planetary and Space Sci.*, 46: 129–150.
- WALESIK T. 2017 – Kratery Morasko w świetle wiedzy na temat ukończonych impaktów. *Acta Soc. Meteorit. Polon.*, 8: 149–168.
- WIERZBICKI J. 2013 – Wielka kolonizacja. Społeczności kultury pucharów lejkowatych w dorzeczu środkowej Warty: koniec V poł. III tys. BC. *Biblioteka Wielkopolskich Sprawozdań Archeologicznych*, t. VI. Stow. Nauk. Archeologów Polskich, Oddz. w Poznaniu.
- WŁODARSKI W., PAPIŚ J., SZCZUCIŃSKI W. 2017 – Morphology of the Morasko crater field (western Poland): Influences of pre-impact topography, meteoroid impact processes, and post-impact alterations. *Geomorphology*, 295: 586–597.