

# Materia pozaziemska w otoczeniu kraterów meteorytowych Kaali (Estonia)

## Extraterrestrial material from the surroundings of the Kaali meteorite craters (Estonia)

GRZEGORZ UŚCINOWICZ

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, Instytut Geologii, Maków Polnych 16, 61-606 Poznań;  
e-mail: guscin@amu.edu.pl

---

### Streszczenie

Kraterzy meteorytowe Kaali (wyspa Saaremaa, Estonia) stanowią unikatowe miejsce w Europie, nie tylko ze względu na wyjątkową formę wykształcenia, ale także dostępność do badań metalicznej materii pozaziemskiej. Podczas badań terenowych prowadzonych w maju 2004 roku autor zgromadził próbki osadów, które posłużyły do badań drobnej frakcji materii magnetycznej występującej w obrębie kraterów meteorytowych Kaali. Na podstawie morfologii, cech powierzchni i składu chemicznego wyselekcjonowanych ziaren magnetycznych wyróżniono cztery grupy materii: (1) kosmiczne kulki zbudowane z tlenku żelaza, zawierające nikiel, (2) kulki węglowe, które wstępnie zaklasyfikowano jako antropogeniczne, (3) kulki krzemianowe interpretowane jako zestalone krople wymieszanej materii ziemskiej i pozaziemskiej, i (4) płytki zbudowane z tlenku żelaza, pozbawione niklu, które zinterpretowano jako zwiędzłe pozostałości materii pozaziemskiej.

Opis morfometryczny kraterów Kaali został sporządzony na podstawie danych literaturowych oraz wizji lokalnej przeprowadzonej przez autora.

**Słowa kluczowe:** materia pozaziemska, kraterzy Kaali, sferule, Estonia

### Abstract

The Kaali meteorite crater field is a unique place in Europe, not only because of its morphology but also because of the presence of large amounts of extraterrestrial material. During field work in May 2004, samples were collected at this site with the objective to study magnetic fines. Based on morphology, surface features and chemical composition of the selected magnetic material, four groups of spherules and plates were distinguished: (1) Ni-bearing Fe-oxide spherules of cosmic origin, (2) carbon spherules tentatively classified as anthropogenic, (3) silicate spherules interpreted as solidified droplets of mixed terrestrial and extraterrestrial matter, and (4) Ni-free Fe-oxide plates interpreted as weathered remnants of extraterrestrial material.

The Kaali crater site is described morphologically on the basis of literature and the author's own observations.

**Key words:** extraterrestrial material, Kaali crater field, spherules, Estonia

### Wstęp

Do Ziemi nieustannie dociera nie tylko energia, ale i materia pozaziemska. Najbardziej spektakularne są oczywiście wielkie bryły me-

teorytów. Jednak przeważającą część tej materii stanowią drobne okruchy, w dużej mierze pyłowe. Znaczny udział w generowaniu tych frakcji mają meteory. W momencie ich przechodzenia przez atmosferę, bądź w momencie kolizji,

dochodzi do dezintegracji/ablacji i wyrzucenia do atmosfery dużych ilości przetopionej materii. Materia ta po kondensacji opada na powierzchnię Ziemi, stając się jej integralnym składnikiem (Klekociuk *et al.* 2005; Taylor *et al.* 2000). Sytuacja taka miała miejsce wiele razy w historii Ziemi. Również destrukcyjne efekty upadku meteorytów obserwować można w skałach niemal każdego wieku (Stankowski 2006). Najbardziej przemawiające do wyobraźni są kraterzy meteorytowe, powstające zarówno w skałach krystalicznych, jak i najmłodszej pokrywie osadowej. Metaliczna materia zachowana w osadach jest zapisem takich właśnie gwałtownych wydarzeń kosmicznych, jak upadki meteorytów (Simons & Glass 2004). Materia pozaziemska możliwa jest do pozyskiwania zarówno w wyższych partiach atmosfery, jak w skałach, lodach lodowców oraz w oceanicznych osadach dennych (Brownlee *et al.* 1983; Taylor & Brownlee 1991; Taylor *et al.* 2000). W niniejszej pracy zawarty jest opis materii magnetycznej wydobytej z osadów w otoczeniu kraterów Kaali.

Kraterzy Kaali są efektem upadku meteorytów na podłoże litych skał, zalegających pod cienką pokrywą osadów nieskonsolidowanych. Do lat sześćdziesiątych XX wieku były one jedynymi w Europie kraterami o udowodnionej genezie meteorytowej (Raukas 2004). Obszar kraterów Kaali (Fig. 1) położony jest w południowo-wschodniej części wyspy Saaremaa (Estonia), 18 km na północny-wschód od miasta Kuressaare. Dziewięć kraterów meteorytowych Kaali znajduje się na obszarze o powierzchni jednego kilometra kwadratowego.

W skład meteorytu Kaali wchodzi głównie żelazo (91,5%) i nikiel (8,3%) (Tiirmaa 1994; Raukas 2004). Analizy mineralogiczne wykazały występowanie minerałów typowych dla żelaznych meteorytów, takich jak kamacyt, taenit, troilit, stwierdzono również oliwin. We współczesnej klasyfikacji meteoryt Kaali zaliczany jest do grupy IA oktaedrytów gruboziarnistych (Tiirmaa 1994; Raukas 2004).

W połowie lat siedemdziesiątych rozpoczęto systematyczne badania rozproszenia fragmentów meteorytu Kaali (Tiirmaa 1994). Udokumentowano ich nieregularny rozkład. Fragmenty meteorytu występują w małych kraterach, ale brak ich w kraterze głównym (Raukas 2004).

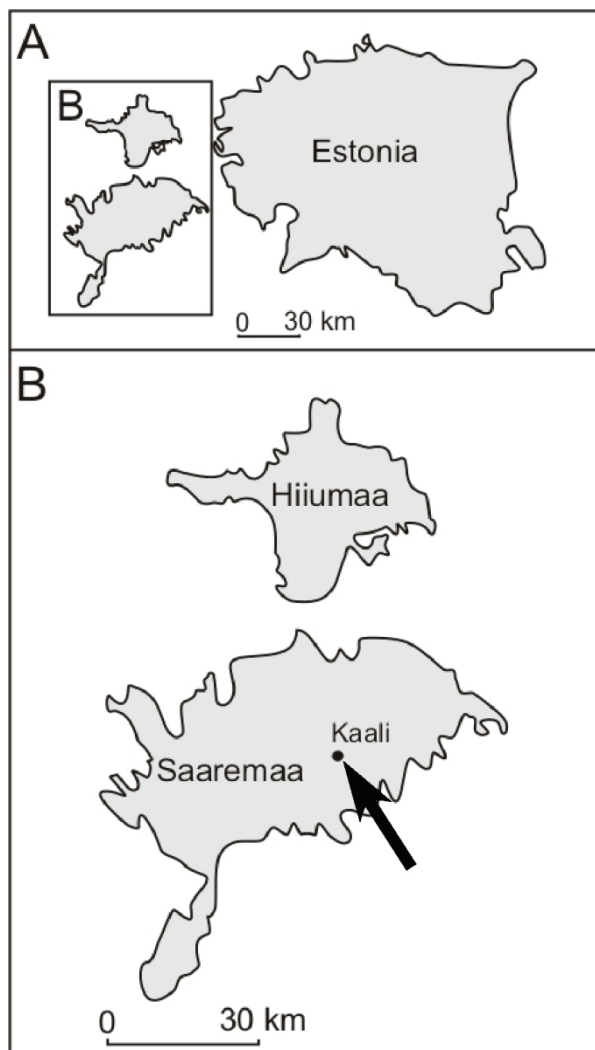


Fig. 1. Lokalizacja kraterów Kaali  
Fig. 1. Location of the Kaali impact site

Natomiast w kraterze głównym można obserwować najdrobniejszą materię pyłową. O ile większe fragmenty zostały całkowicie usunięte z krateru głównego w wyniku eksplozji, to najdrobniejsza materia mogła się w nim, a szczególnie w obrębie jego wałów, zachować. Pod koniec lat siedemdziesiątych rozpoczęto badania nad rozmieszczeniem i cechami właśnie tej najdrobniejszej frakcji (mniejszej niż 1 mm). Na podstawie tych badań została sporządzona podstawowa klasyfikacja materii pyłowej. Klasyfikacja ta uwzględniała trzy główne typy materii: fragmenty meteorytów, pył meteorytowy i mikroimpaktyty (powstałe w wyniku częściowego topienia materii meteorytowej i skał ziemskich) (Tiirmaa 1994; Raukas 2000a, 2004).

Celem podjętej pracy była separacja, identyfikacja i charakterystyka materii ferromagnetycznej pochodzenia pozaziemskiego w kraterach meteorytowych Kaali oraz w ich otoczeniu. Badania zmierzały do zebrania danych porównawczych dla innych obszarów upadku materii pozaziemskiej oraz przyszłego dokumentowania nowych stanowisk związanych z zapisem zjawisk pozaziemskich (kratery i materia kosmiczna w osadach).

## Metody badań

W maju 2004 roku autor podjął prace badawcze. Wykonano szereg odwiertów i wykopów, z których pobrano ponad 60 próbek osadów o masie ~500 g. Zakres terenowy prowadzonych prac objął zewnętrzną i wewnętrzną stronę wału okólnego krateru głównego oraz kratery numer 1 i 3 (Fig. 2). Dodatkowo próbki zostały pobrane z wierceń i wykopów wykonanych pomiędzy kraterem głównym a kraterem numer 1 oraz 6 i 20 m na południowy-zachód od krawędzi wału krateru nr 1. Ponadto wykonano dwa wykopy usytuowane 35 i 110 m na wschód od krawędzi krateru numer 3.

Pewną komplikacją podjętych prac badawczych stanowiło stanowisko archeologiczne (kuźnia) usytuowane po zachodniej stronie wałów krateru głównego. Znajdowano tam dużo kulek metalicznych, prawdopodobnie antropogenicznego pochodzenia. Próbką pobrana z tego stanowiska posłużyła jako materiał porównawczy pomocny w rozróżnianiu kulek pozaziemskich i tych pochodzenia antropogenicznego.

W laboratorium próbki zostały przemyte na sicie o średnicy oczek 0,063 mm w celu pozbycia się frakcji ilastej i pyłowej. Następnie po osuszeniu pozostałego materiału, przy pomocy silnego magnesu dokonano separacji frakcji ferromagnetycznej. Z uzyskanej frakcji, przy użyciu lupy binokularnej, wytypowano ziarna do dalszych badań.

Analizy składu chemicznego oraz zdjęcia wybranego materiału zostały wykonane w Pracowni Mikroskopii Skaningowej Nauk Biologicznych i Geologicznych na Uniwersytecie Jagiellońskim. Laboratorium wyposażone jest w mikroskop typu HITACHI S-4700 z mikro-

analizatorem składu chemicznego EDS typu NORAN Vantage. Próbkę napyłane były przy pomocy napyłarki węglowej z pomiarem grubości warstwy węgla. Wszystkie analizy chemiczne były przeprowadzane punktowo na powierzchni badanej próbki.

Głównym celem badań była analiza jakościowa materii ferromagnetycznej, dlatego też autor nie oszacował ilości sferul w osadzie.

## Uwarunkowania geologiczne

Podłoże czwartorzędu wyspy Saaremaa tworzą w całości skały węglanowe wieku wczesno- i późnosylurskiego. W obrębie pola meteorytowego Kaali, pod cienką warstwą osadów czwartorzędowych, znajdują się uławiczone, późnosylurskie dolomity. Bezpośrednio na nich zalegają osady czwartorzędowe, głównie gliny bazalne wykształcone jako gliny ilaste, gliny piaszczyste i piaski gliniaste zaliczane do fazy Jarva ostatniego zlodowacenia (Raukas *et al.* 2004; Raukas & Stankowski 2005). Grubość tej pokrywy w rejonie wyspy Saaremaa nie przekracza 5 m. Występowanie tylko cienkiej warstwy osadów ostatniego zlodowacenia wskazuje, że osady starsze zostały zerodowane przed i podczas awansu lądolodu ostatniego glacjału, i w efekcie doszło do depozycji glin bazalnych bezpośrednio na osadach sylurskich. Po wycofaniu się lądolodu na obszar ten wkroczyło morze, które względnie szybko ustąpiło wskutek relaksacyjnych ruchów glacioizostatycznych (Raukas *et al.* 2004; Raukas & Stankowski 2005; Hoppe *et al.* 2002).

Północno-zachodnia Estonia wynurzyła się z morza około 11000 lat temu (Hoppe *et al.* 2002). Poprzez stałe wydźwiganie się lądu w holocenie pojawiły się nowe wyspy Saaremaa, Hiiumaa, Muhu. Wypadkowa zmian poziomu morza oraz tempa wynoszenia sprawiły, że obszar Kaali został prawdopodobnie całkowicie wydźwignięty ponad poziom morza około 7500 lat temu (Tavast 2000).

Powierzchnia terenu w rejonie kraterów Kaali, podobnie jak w przeważającej części wyspy Saaremaa, jest równinna o deniwelacjach nie przekraczających 4 m. Powierzchnię terenu budują osady moreny dennej, bez wyraźnych śladów akumulacji morskiej.

## Charakterystyka morfometryczna kraterów meteorytowych

Krater Kaali składają się z krateru głównego i ośmiu małych kraterów towarzyszących (Fig. 2). Na dnie największego, głównego krateru znajduje się naturalne jezioro, podlegające znacznym sezonowym zmianom poziomu wody. Jego średnica waha się sezonowo od 30 do 60 m, a głębokość zmienia się od 1 do 6 m (Tiirmaa 1994; Veski *et al.* 2004). Mniejsze kraterki stanowią niewielkich rozmiarów zagłębienia otoczone słabo rysującym się wałem. Część z nich jest wtórnie wypełniona materiałem z denudacji otoczenia (np. krater nr 7).

Krater główny zajmuje skrajnie północną pozycję w stosunku do pozostałych form. Większość kraterów pobocznych (3, 4, 5, 7, 2/8) zlokalizowanych jest na południowy-wschód od niego. Dwa pozostałe (1, 6) znajdują się natomiast po południowo-zachodniej stronie. Największe kraterki poboczne (1, 3), o podobnych rozmiarach, usytuowane są nie tylko w różnych kierunkach, ale i odległości od krateru głównego.

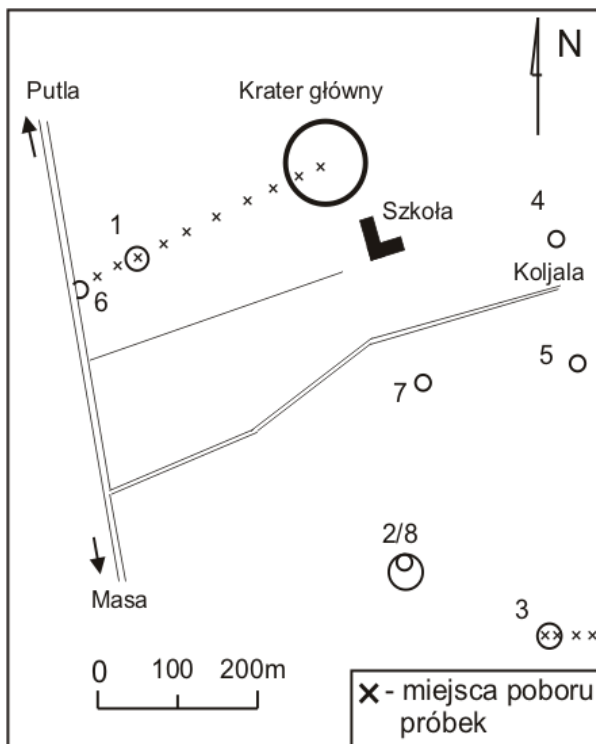


Fig. 2. Plan rozmieszczenia kraterów Kaali  
Fig. 2. Areal distribution of the Kaali craters

## Krater główny

Średnica głównego krateru, mierzona na szczycie wału, wynosi 105–120 m. Średnia głębokość krateru, od szczytu wału do powierzchni osadów jeziornych sięga 16 m, a maksymalna miąższość osadów wypełniających dochodzi do 5,8 m. Wynika z tego, że pierwotna głębokość krateru wynosiła przynajmniej 22 m (Tiirmaa 1994). Górna część wału zbudowana jest z materiału wyrzuconego z krateru podczas eksplozji oraz warstw dolomitowych wychylonych pod kątem od 25° do 90° od pierwotnego położenia (Fig. 3) (Tiirmaa 1994; Veski *et al.* 2001, 2004). Niektóre warstwy dolomitu są nawet całkowicie odwrócone.

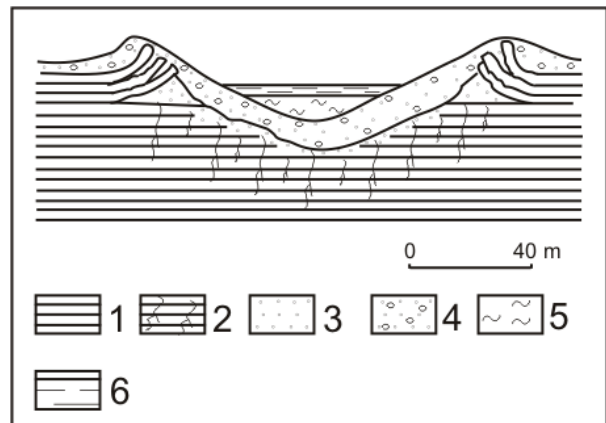


Fig. 3. Przekrój geologiczny przez główny krater Kaali (wg Raukasa 2000)

1 = dolomity sylurskie, 2 = dolomity zniszczone podczas upadku meteorytu, 3 = pył dolomitowy, 4 = brekcja dolomitowa zmieszana z gliną, 5 = torf i gytja, 6 = woda

Fig. 3. Geological cross-section of the Kaali main crater (after Raukas 2000)

1 = Silurian dolomites; 2 = dolomites destroyed during impact; 3 = dolomite powder; 4 = dolomite breccia with till inclusions; 5 = peat and gyttja; 6 = water

Wychylone bloki zalegają na 6 m miąższości warstwie rozkruszonego dolomitu uformowanej w wyniku uderzenia (Tiirmaa 1994). Na dnie krateru znajduje się 8–10 m miąższości warstwa rozkruszonej i przemieszczonej brekcji dolomitowej. Badania geofizyczne, prowadzone przez naukowców rosyjskich, wykazały, że głębiej położone warstwy dolomitu zalegają mniej więcej poziomo, ale również są spękane i rozkruszone. Strefa objęta odkształceniem sięga do głębokości 50 m (Tiirmaa 1994).

## Kraterzy poboczne

Numeracja kraterów pobocznych została ustalona w trakcie wieloletnich badań prowadzonych przez licznych naukowców w obrębie pola meteorytowego Kaali. Wynika w głównej mierze z kolejności odkrywania kolejnych kraterów.

Krater nr 1, o średnicy 39 m i głębokości 4 m, jest łatwo zauważalny w obrębie pól uprawnych. Poddarte warstwy dolomitowe są tu eksponowane podobnie, jak w kraterze głównym (Tiirmaa 1994).

Krater nr 2/8 został uformowany w wyniku upadku dwóch oddzielnych odłamków meteorytu, tworząc jeden krater o skomplikowanej, nietypowej morfologii (*op. cit.*). W 1975 roku północna część została rozpoznana przez A. Aaloe, estońskiego geologa i badacza kraterów Kaali, jako samodzielna forma o średnicy 25 m i jest uznawana za krater nr 2. Południowa część o średnicy 36 m jest oznaczana numerem 8. Podłużna oś podwójnego krateru wynosi 53 m (Tiirmaa 1994).

Krater nr 3 o średnicy 33 m i głębokości 3,5 m jest, obok krateru nr 1, najlepiej zachowaną formą. W kraterze tym, w trakcie wieloletnich badań, znaleziono ponad 200 gramów metalicznych fragmentów meteorytowych (*op. cit.*).

Krater nr 4 został silnie przekształcony w skutek prowadzonych w nim intensywnych badań. W dnie krateru występuje wyraźnie zaznaczone przegłębienie, znaczące miejsce uderzenia. Natomiast skalne podłoże odznacza się zmianami konsystencji, spowodowanymi silnym rozdrobnieniem (*op. cit.*).

Krater nr 5 ma średnicę 13 m i jest głęboki na 0,9 m. Jednak można przypuszczać, że jego pierwotna głębokość wynosiła 3 m. Największy fragment meteorytu (38,4 g) znaleziono w tym właśnie kraterze (Tiirmaa 1994).

Krater nr 6 tworzy zagłębienie o średnicy 26 m i głębokości 0,6 m. W zasadzie jego obecny stan nie pozwala zidentyfikować go jako krateru meteorytowego. Wynika to z faktu, że jest on częściowo zniszczony w wyniku robót drogowych.

Krater nr 7 ma średnicę 15 m, a aktualna głębokość wynosi 1 m. Jest on w znacznym stopniu wypełniony osadami pochodzącymi z denudacji otoczenia (Tiirmaa 1994).

Badania kraterów pobocznych przyniosły wiele cennych informacji o upadku meteorytów.

Informacje te były niemożliwe do pozyskania z krateru głównego, pomimo, że jest on dobrze wykształcony, ale siła uderzenia i eksplozji doprowadziły do usunięcia części materiału ilustrującego skutki upadku (Tiirmaa 1994).

Szacuje się, że prędkość meteorytu Kaali w momencie wejścia w atmosferę wynosiła od 15 do 45 km/s, a w chwili uderzenia 10–20 km/s, przy czym nadleciał on z kierunku północno-wschodniego (Tiirmaa 1994; Raukas 2004; Raukas & Laigna 2005). Nie wiadomo, kiedy nastąpił jego rozpad i z jakimi prędkościami poruszały się poszczególne bryły. Rozkład kraterów jest chaotyczny, a co za tym idzie trudno jest wyznaczyć zarys elipsy rozrzutu.

## Wiek kraterów meteorytowych Kaali

Do określenia wieku kraterów Kaali zastosowano różne metody. Biorąc pod uwagę struktury geologiczne w kraterach i znając historię geologiczną regionu, można uznać, że powstały one po wynurzeniu się obszaru Kaali z morza. Wynika to z faktu, iż nie ma osadów morskich zarówno w kraterach jak i w ich otoczeniu.

Dane archeologiczne i dendrochronologiczne wskazują, że kraterzy nie mogły powstać wcześniej niż 2600 lat temu (Tiirmaa 1994; Raukas 2000a–b). Natomiast analizy pyłkowe osadów wypełniających główny krater Kaali wskazują na 3500 do 3900 lat (Tiirmaa 1994; Raukas 2000a–b). Jednak datowania osadów jeziornych wypełniających krater główny nie dają jednoznacznych rezultatów. Wynika to z faktu, że woda i osady wypełniające krater zaczęły się gromadzić długo po upadku meteorytu i datowania uzyskane z próbek pobranych w tych osadach są niepewne (Raukas *et al.* 2004).

Datowania radiowęglowe fragmentów węgla drzewnego znalezionych w osadach wypełniających krater 2/8 wskazały na wiek  $2660 \pm 200$  lat (Tiirmaa 1994; Raukas 2000a, b). Późniejsze datowania przyniosły względne potwierdzenie tego wieku. Opierając się na tych danych uznano datę  $2800 \pm 100$  jako najbardziej prawdopodobny czas formowania kraterów (Tiirmaa 1994; Raukas 2000a–b). Jednakże, tak jak

w przypadku osadów jeziornych, datowania osadów wypełniających krater 2/8 rodzą wątpliwości.

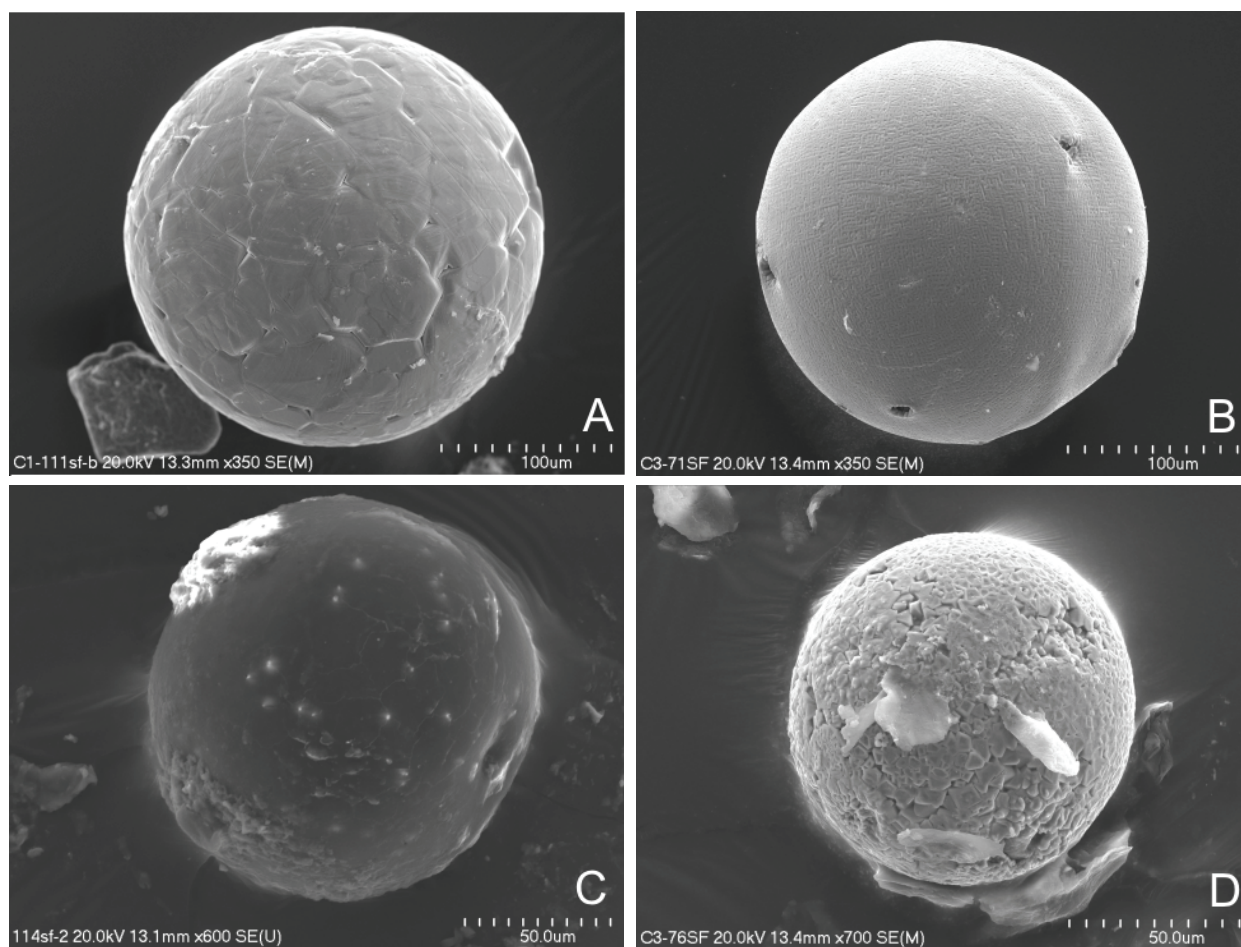
Kulki kosmiczne (sferule), podobne do znalezionych w Kaali, są znane z innych stanowisk na wyspach Saaremaa i Hiiumaa. Osady o największym nagromadzeniu tychże kulek zostały wydатовane (metodą palinologiczną i radiowęglową) na  $7586 \pm 67$ ,  $7669 \pm 46$  i  $7558 \pm 65$  (Raukas 1996, 2000a). Jednakże uważa się, że są one zapisem wcześniejszego zdarzenia kosmicznego, nie związanego z upadkiem meteorytu Kaali (Veski *et al.* 2001, 2004).

Zarówno datowania fragmentów węgla drzewnego, jak i wyniki analiz pyłkowych mówią tylko o wieku osadów wypełniających krater. Niewątpliwie jest natomiast, że same krater są starsze niż uzyskane daty. Duży przedział

czasowy, jaki uzyskano w wyniku zastosowania różnych metod ukazuje, jak trudnym problemem jest dokładne określenie czasu upadku meteorytu Kaali. Wątpliwości nie ma tylko do tego, że miało to miejsce w holocenie, po wydzwignięciu wyspy w skutek ruchów glacioizostacyjnych ponad poziom morza.

## Rodzaje materii magnetycznej

Rezultaty badań, w tym badań składu chemicznego przy zastosowaniu mikrosondy, pozwoliły na wyróżnienie czterech grup materii – trzech grup w obrębie kulek (sferul) oraz grupy płytek. Zebrane fragmenty magnetyczne ukazują różnorodność form.



**Fig. 4.** Przykłady materii magnetycznej: A, B = sferule zbudowane z tlenku żelaza, C = sferula węglowa, D = sferula krzemianowa  
**Fig. 4.** SEM photomicrographs of magnetic material. A, B = cosmic Fe-oxide spherules; C = carbon spherule; D = silicate spherule

### Grupa 1

Kulki (sferule) o przeważającej zawartości tlenku żelaza. Zawartość tego związku waha się w nich od 90 do 99%. Ponadto, w tego typu kulkach występują domieszki niklu. Zawartość niklu w kulkach grupy 1 jest zróżnicowana, od 10% do niemal całkowitego braku tego pierwiastka. Notuje się także śladowe ilości (<1%) takich pierwiastków, jak krzem, mangan, glin. Kulki o dominującej zawartości tlenku żelaza mają rozmiary od 50 do 150  $\mu\text{m}$ . Przeważa postać niemal idealnie kulista. Ich powierzchnia jest błyszcząca o połysku metalicznym. Sferule te mają ciemne barwy. Posiadają zróżnicowaną fakturę powierzchni od urozmaiconej, silnie spękanej, w ogólnym zarysie zbudowanej z wielokątnych płytek (Fig. 4A) do gładkiej z drobnym dendrytycznym wzorem (Fig. 4B).

### Grupa 2

Kulki (sferule) o przeważającej zawartości węgla (od 68 do 95%). Występują również domieszki innych pierwiastków: CaO (do 18%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (do 9%), SiO<sub>2</sub> (do 3%), CuO (do 2%), ZnO (do 2%). Rozmiary kulek wynoszą od 50 do 100  $\mu\text{m}$ . Forma jest kulista, natomiast powierzchnia zwykle matowa i spękana (Fig. 4C).

### Grupa 3

Kulki (sferule) o znacznej zawartości SiO<sub>2</sub> (od 31% do 57%). Występują w nich inne tlenki, takie jak Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (do 36%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (do 29%), MgO (do 6%), MnO (do 1%). Wielkość kulek wynosi od 50 do 200  $\mu\text{m}$ . Kształt jest kulisty o urozmaiconej fakturze powierzchni, usianej bruzdami, silnie chropowatej (Fig. 4D).

### Grupa 4

Płytki o zawartości Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sięgającej 98%. Obserwuje się w nich nieznaczne domieszki tytanu. Rozmiary ich wynoszą około 200  $\mu\text{m}$ . Obiekty te mają postać czarnych płytek o nieregularnych, ostrych krawędziach.

## Dyskusja

Dzięki znacznej ilości przebadanego materiału i wykonanym analizom udało się wyodrębnić różne rodzaje materii magnetycznej, w tym materii pozaziemskiej. Dokonując po-

równania wyników pracy z pracami wcześniejszymi (Simanovich *et al.* 1995; Raukas 2000a–b, 2004; Marini *et al.* 2004) można zauważyć szereg zbieżności. Ponadto przeprowadzone badania umożliwiły wyodrębnienie materiału nieudokumentowanego dotychczas w literaturze.

Grupa 1, tzw. żelazne kulki, została szczegółowo opisana w literaturze (Simanovich *et al.* 1995; Raukas 2000a–b, 2004; Marini *et al.* 2004). Takie kuliste obiekty powstają z przetworzenia pierwotnej materii meteorytowej w warunkach wysokotemperaturowych. W momencie wchodzenia w atmosferę meteoryt ulega gwałtownemu ogrzaniu. Dochodzi do częściowego stopienia i odparowania jego powierzchni a następnie materia ta w miarę obniżania się temperatury otoczenia ulega kondensacji i krzepnięciu. W ten sposób dochodzi do opadu skondensowanego metalicznego obłoku na powierzchnię Ziemi (Żbik 1984; Simanovich *et al.* 1995; Raukas 2004). Tekstura, rozmiar oraz skład tego typu sferul odpowiada obiektom opisywanym we wcześniejszych opracowaniach jako kosmiczne (Raukas 2000a–b, 2004; Marini *et al.* 2004). Dlatego też można uznać, że kulki te dokumentują czas od wejścia meteorytu w górne warstwy atmosfery do masowego opadania materii meteorytowej.

Najprawdopodobniej w tej samej fazie powstały płytki grupy 4, jednak ich forma wskazuje, że nie były one poddawane tak intensywnemu obtapianiu jak mniejsze fragmenty. Prawdopodobnie powstały w wyniku strzaskania zewnętrznych, metalicznych fragmentów meteorytu i poddaniu ich szokowemu działaniu ciśnienia. Ich nieregularne krawędzie wskazują, że dominującym czynnikiem kształtującym je było ciśnienie, a nie jak w przypadku sferul grupy 1 temperatura (Marini *et al.* 2004). Obecny stan wiedzy nie pozwala jednoznacznie rozstrzygnąć problemu braku niklu w tej grupie. Raukas (2000a) próbuje tłumaczyć to zagadnienie procesami wietrzeniowymi. Natomiast Stankowski *et al.* (2006) i Marini *et al.* (2004) brak niklu upatrują, między innymi, w migracji tego pierwiastka w trakcie procesów towarzyszących przechodzeniu meteorytu przez atmosferę. Obecność tytanu w tej grupie jest niewielka (<1%) i nie odbiega od zawartości tego pierwiastka w innych grupach.

Natomiast sferule grupy 3 mogły powstać w wyniku częściowego topienia i odparowania

materii ziemskiej i pozaziemskiej wyrzuconej do atmosfery po impakcie (Raukas 2004). Wskazuje na to zawartość krzemu oraz pierwiastków metalicznych w ich składzie. Głównym składnikiem metalicznym (pochodzenia pozaziemskiego) byłyby związki żelaza. Natomiast domieszkami ziemskimi, pochodzącymi z osadów czwartorzędowych, związki krzemu i glinu. Najprawdopodobniej powstały tuż po uderzeniu meteorytu, gdy wysoka temperatura i ciśnienie stworzyły dogodne warunki do przenikania się pierwiastków ziemskich z zawartymi w meteorycie. Świadczyć może o tym fakt, że analogiczne obiekty były znajdowane w tym rejonie (Raukas 2000a-b; Raukas 2004). Jednakże potwierdzenie tej tezy wymaga dalszych badań.

Osobnym zagadnieniem jest pochodzenie kulek węglowych grupy 2. Największa ich ilość została znaleziona w obrębie stanowiska archeologicznego (kuźnia), leżącego w bezpośrednim sąsiedztwie krateru głównego. Trzeba zaznaczyć, że był to jedyny rodzaj kulek jaki tam znaleziono. Może to wskazywać na ich antropogeniczne pochodzenie. Jednakże kulki węglowe były również znajdowane w niewielkich ilościach w kraterze nr 1. Sprawia to, iż należałoby się zastanowić nad możliwością „zanieczyszczenia” wałów krateru nr 1 (kulki przeniesione przez ludzi lub wiatr). Jednocześnie, wydaje się, że są to kulki odmienne od kulek opisywanych we wcześniejszej literaturze (Marini *et al.* 2004). Świadczy o tym fakt, że kulki opisane przez Mariniego są tylko częściowo pokryte cienkim filtrem węglowym organicznego pochodzenia. Natomiast kulki węglowe opisane w niniejszej pracy sprawiają wrażenie jednolitych, o masywnej strukturze. Pewną wskazówką co do genezy tych kulek byłoby zapoznanie się z procesami wytopu żelaza, stosowanymi w czasie, gdy w obrębie stanowiska archeologicznego mieściła się kuźnia. Dałoby to odpowiedź na pytanie, czy możliwe jest powstanie kulek węglowych w trakcie tego procesu.

## Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania potwierdziły rezultaty wieloletnich badań obszaru upadku meteorytów Kaali. Potwierdzono występowanie

różnego rodzaju kulek (sferul) oraz płytek o niewątpliwie kosmicznym pochodzeniu (Marini *et al.* 2004). O ich pozaziemskim pochodzeniu świadczą takie cechy, jak skład, forma czy charakter powierzchni. Rozpoznano istnienie nowej grupy kulek (grupa 2) o przeważającej zawartości węgla i zróżnicowanej zawartości innych pierwiastków (CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, ZnO, CuO). Autor skłania się, aby ich pochodzenie uznać za antropogeniczne. Reasumując, badany materiał zawiera przekształcone pozostałości meteorytu (kulki i płytki o przeważającej zawartości Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) i pochodne powstałe w wyniku jego upadku (kulki o znacznej zawartości SiO<sub>2</sub>). A zatem, frakcja magnetyczna jest zapisem procesów, które przebiegały na różnych etapach, od wejścia meteorytu w atmosferę (kulki i płytki grupy 1 i 4) po samo uderzenie (kulki grupy 3).

Obserwacje z obszaru meteorytowego Kaali znajdują zastosowanie w przyszłych badaniach autora na terenach o domniemanej genezie impaktowej. Uzyskane dane z obszaru kraterów Kaali posłużą także jako materiał porównawczy do rozpoznawania materii pozaziemskiej w osadach kenozoiku na obszarze Polski, a szczególnie Wielkopolski.

## Podziękowania

Autor dziękuje prof. dr. hab. Wojciechowi Stankowskiemu za wsparcie, a recenzentom pracy, prof. dr. hab. Ł. Karwowskiemu, prof. dr. hab. A. Muszyńskiemu i dr J. Biernackiej za liczne uwagi, które przyczyniły się do ulepszenia tekstu.

## Literatura

- BROWNLEE D., BATES B., BEAUCHAMP R., 1983: Meteor ablation spherules as chondrule analogs. [In:] E. KING (Ed.): *Chondrules and their origin*. Lunar and Planetary Institute, Houston, 10-25.
- HOPPE G., NOULIK I. & PUNNING J., 2002: Shoreline development and Swedish colonization of north-west Estonia during the Middle Ages. *Geojournal*, 56: 185-190.
- KLEKOCIUK A.R., BROWN P., PACK DEE W., REVELLE D., EDWARDS W., SPALDING R., TAGLIAFERRI E., YOO B. & ZAGARI J., 2005: Meteoritic dust from the atmospheric disintegration of a large meteoroid. *Nature*, 436: 1132-1135.
- MARINI F., RAUKAS A. & TIIRMAA R., 2004: Magnetic fines from the Kaali impact-site (Holocene, Estonia): Prelim-



- inary SEM investigation. *Geochemical Journal*, 38: 107–119.
- RAUKAS A., 1996: Investigation of extraterrestrial spherules and microimpactites – a new tool in regional stratigraphy. [In:] *The third Baltic stratigraphical conference. Abstracts & field guide*. Tartu, 56.
- RAUKAS A., 2000a: Investigation of impact spherules – a new promising method for the correlation of Quaternary deposits. *Quaternary International*, 68–71: 241–252.
- RAUKAS A., 2000b: Study of meteoritic matter for precise regional stratigraphy. *Geologos*, 5: 77–86.
- RAUKAS A., 2004: Distribution and composition of extraterrestrial spherules in the Kaali area (Island of Saaremaa, Estonia). *Geochemical Journal*, 38: 101–106.
- RAUKAS A. & LAIGNA K., 2005: Height of the turbulent gas flow and transport distance of glassy spherules on the example of the Kaali impact, Estonia. *Proceedings of the Estonian Academy of Science*, 54: 145–152.
- RAUKAS A. & STANKOWSKI W., 2005: Influence of sedimentological composition on OSL dating of glaciofluvial deposits: examples from Estonia. *Geological Quarterly*, 49: 463–470.
- RAUKAS A., KALM V., KARUKAPP R. & RATTAS M., 2004: Pleistocene glaciations in Estonia. [In:] J. EHLERS & P.I. GIBBARD (Ed.): *Quaternary Glaciations – Extend and Chronology*. Elsevier, 83–91.
- RAUKAS A., PIRRUS R., RAJAMAE R. & TIIRMAA R., 1995: On the age of the meteorite craters at Kaali (Saaremaa island, Estonia). *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Geology*, 44: 177–183.
- SIMANOVICH S., KOLOSOVA T., & RAUKAS A., 1995: Scanning electron microscopy of ferriferous minerals in the Quaternary deposits of the Baltic states and Belarus. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Geology*, 44: 111–118.
- SIMONS B. & GLASS B., 2004: Spherules layers – records of ancient impacts. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 32: 329–361.
- STANKOWSKI W., 2006: Od sferulek po glob ziemski. *Referaty*, Polskie Towarzystwo Geologiczne, Poznań, 15: 155–169.
- STANKOWSKI W., KATRUSIAK A. & BUDZIANOWSKI A., 2006: Crystallographic variety of magnetic spherules from Pleistocene and Holocene sediments in the northern foreland of Morasko – Meteorite Reserve. *Planetary and Space Science*, 54: 60–70.
- TAVAST E., 2000: Subfossils mollusk shells of the Baltic Sea and the possibilities of their usage in the stratigraphy and correlation of the Baltic Sea sediments. *Geologos*, 5: 31–40.
- TAYLOR S. & BROWNLEE D., 1991: Cosmic spherules in the geological record. *Meteoritics*, 26: 203–211.
- TAYLOR S., LEVER J.H. & HARVEY R.P., 2000: Numbers, types and composition of an unbiased collection of cosmic spherules. *Meteoritics & Planetary Science*, 35: 651–666.
- TIIRMAA R., 1994: *Kaali meteoriit*. Eesti Teaduste Akadeemia Geoloogia Instituut, Talin, 85–92.
- VESKI S., HEINSALU A., KIRSIMAE K., POSKA A. & SAARSE L., 2001: Ecological catastrophe in connection with the impact of the Kaali meteorite about 800–400 B.C. on the island of Saaremaa, Estonia. *Meteoritics & Planetary Science*, 36: 1367–1375.
- VESKI S., HEINSALU A., LANG V., KESTLANE U. & POSSNERT G., 2004: The age of the Kaali meteorite craters and the effect of the impact on environment and man: evidence from inside the Kaali craters, island of Saaremaa, Estonia. *Vegetation History and Archeobotany*, 13: 197–206.
- ŽBIK M., 1984: Sferule pochodzenia kosmicznego z warstwy ilów końca epoki kredowej. *Przegląd Geofizyczny*, 29: 359–365.

Manuskrypt otrzymano 8 czerwca 2007;  
poprawioną wersję zaakceptowano do druku 12 listopada 2008.

