



## Wyniki badań mineralogicznych i petrologicznych nowych okazów meteorytu Pułtusk w 150 rocznicę spadku

Tadeusz A. Przylibski<sup>1</sup>, Katarzyna Łuszczek<sup>1</sup>



T.A. Przylibski



K. Łuszczek

**Results of mineralogical and petrological research of new samples on the Pułtusk meteorite at the 150<sup>th</sup> anniversary of the fall.** *Prz. Geol.*, 66: 368–378.

*Abstract.* One of the largest observed stone meteorite shower in the history of mankind on Earth took place on Thursday evening on January 30, 1868, about seven o'clock near Pułtusk in Poland. Despite the 150<sup>th</sup> anniversary of the fall of chondrite officially classified as Pułtusk H5 with a shock stage S3 there is still little published data on the chemical composition of minerals of this chondrite as well as its petrological characteristics in the literature. The authors carried out mineralogical and petrological research that will help a little to fill this gap in knowledge about the Pułtusk chondrite. Meteorite specimens found by Piotr Kuś in 2015 and investigated by the authors are undoubtedly part of the Pułtusk fall of January 30, 1868. They can be classified as ordinary chondrite H5, S2,W2. The authors stated that the studied rock is

characterized by a varied shock level – from S1 to S2/3, as well as it contains chondrules of the chromite-plagioclase unequilibrated rock. In the composition of the examined fragment of Pułtusk chondrite, the authors identified silicates: olivine, diopside, bronzite and clinohyperstene, and oligoclase, oxides: chromite (and spinel), sulfides: troilite, FeNi alloy mineral phases: kamacite and taenite, as well as phosphates: merrillite and apatite. The chemical composition of olivine crystals as well as low- and high-Ca pyroxenes crystals and plagioclase crystals (about the composition of oligoclase) confirms that the examined specimen comes from the Pułtusk fall and it is a rock that should be classified as a petrographic type H5.

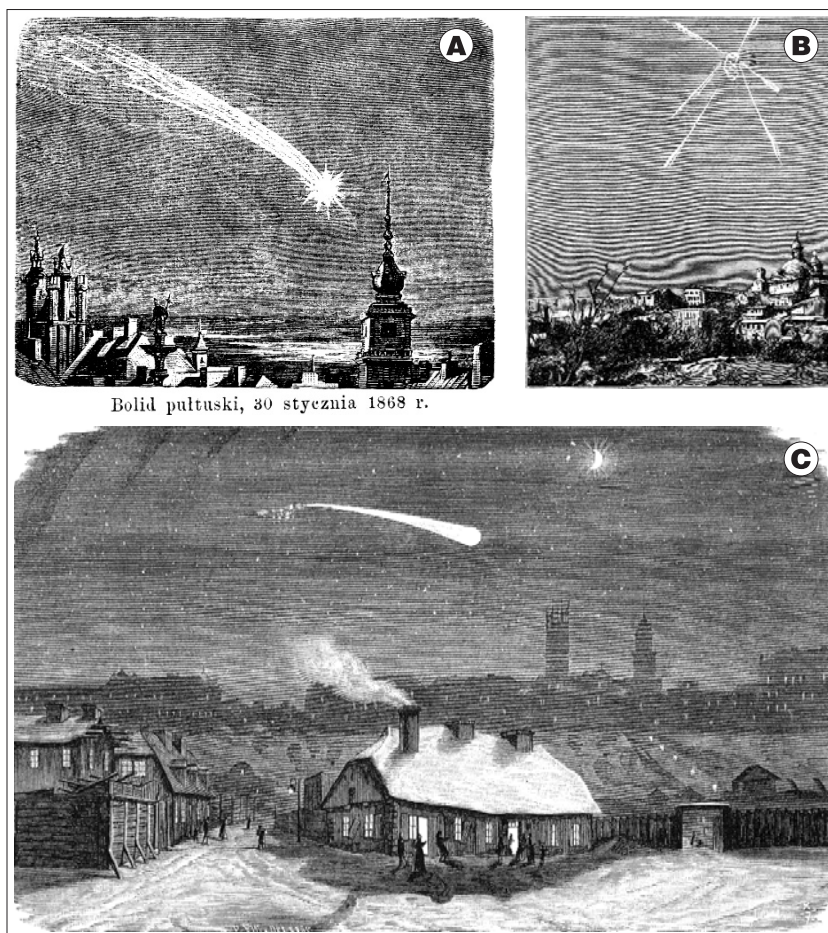
**Keywords:** Pułtusk, meteorite, chondrite, ordinary chondrite, H5 chondrite

W bieżącym roku mija 150 lat od spadku deszczu meteoroidów kamiennych w okolicach Pułtuska. Jest to jedno z największych na Ziemi, obserwowanych i opisanych przez ludzi, zjawisko deszczu meteoroidów kamiennych, które miało miejsce w czwartkowy wieczór 30 stycznia 1868 r. ok. godziny 19.00. Według ówczesnych gazet codziennych nad Warszawą pojawiła się ognista kula, która leciała od Andromedy przez gwiazdozbiory Kasjopei, Cefeusza i Smoka do Wielkiej Niedźwiedzicy, ciągnąc za sobą białawy, zakrzywiony ogon o długości 9°. Bolid został zauważony jako gwiazda pierwszej wielkości. Jego jasność błyskawicznie rosła i wkrótce stał się jaśniejszy niż Księżyc w pierwszej kwadrze. Początkowa biała barwa bolidu stała się zielono-niebieskawa, a w końcu ciemnoczerwona. Mieszkańcy wsi położonych niedaleko Pułtuska opisywali zjawisko bolidu jako kulę ognistą, która stawiała się większa i jaśniejsza, aż nie można było na nią patrzeć (ryc. 1). Potem światło zgasło i usłyszano potężną, przewlekłą detonację, zakończoną serią odgłosów przypominających wystrzały karabinowe lub werble. Mieszkańcy wsi Rowy nad Narwią słyszeli świst spadających kamieni i odgłosy uderzeń o ziemię i lód na rzece. Także we wsi Stary Sielc i Gostkowo słyszano uderzenia kamieni o ziemię, dachy i drzewa, a rankiem znaleziono wiele czarnych kamieni leżących na śniegu i lodzie (Pilski, 1992). Według *Kurjera Warszawskiego* i *Kurjera Codziennego* z 31 stycznia 1868 r. przelot bolidu trwał przeszło 4 sekundy (4–5). Pełniejszy opis zjawiska deszczu Pułtuskiego można znaleźć zarówno w licznych materiałach źródłowych, jak i zestawionych oraz opracowanych przez Kosińskiego

(2007–2008), a także na stronie [http://wiki.meteoritica.pl/index.php/5/Pultusk\\_\(Pu%C5%82tusk\)](http://wiki.meteoritica.pl/index.php/5/Pultusk_(Pu%C5%82tusk)). Bolid Pułtusk był obserwowany w całej Europie środkowej, widziano go z Gdańska, Poznania, Berlina, Krakowa, Pragi, Wiednia, Kowna, Grodna i Tartu w Estonii (Krzesińska, 2013).

Elipsa rozrzutu deszczu pułtuskiego jest przedstawiana na podstawie mapy sporządzonej przez Samsonowicza (1952) (ryc. 2). Wyznaczył on elipsę rozrzutu na powierzchni 16 km<sup>2</sup>, której dłuższa oś przebiegająca z SW na NE ma ok. 18 km, a krótsza 9 km długości. Oficjalnie przyjęte współrzędne miejsca spadku są następujące: 52°46'N, 21°16'E. Masę całkowitą spadku szacuje się oficjalnie na ponad 250 kg (<https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php>, 2018), a prawdopodobne jest, że mogła ona sięgać 2080 kg (Pilski, 1992). Wielkość znalezionych meteoroidów wzrasta w kierunku północno-wschodnim, od 100-gramowych fragmentów w części południowej elipsy rozrzutu do 1,5-kilogramowych w części północnej. Obecnie uważa się, że wchodzący w atmosferę meteoroid był złożony z wielu brył, a elipsa rozrzutu jest w rzeczywistości dwoma nałożonymi na siebie obszarami spadku, tzw. grochu pułtuskiego oraz posortowanego materiału o większych masach (Kamińska, Kosiński, 2009). Najbardziej prawdopodobna wydaje się liczba 69 tys. meteoroidów, otrzymana przez prof. Samsonowicza w wyniku przeprowadzonych przez niego szczegółowych badań terenowych w latach 1922 i 1929, gdy żyli jeszcze ludzie pamiętający to zdarzenie. Okazy meteoroidu Pułtusk, z racji swej liczności i łatwości dostępu, trafiły do co najmniej 150 kolekcji, w tym do

<sup>1</sup> Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Politechnika Wroclawska, Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27; 50-370 Wrocław; Tadeusz.Przylibski@pwr.edu.pl.



Bolid pułtuski, 30 stycznia 1868 r.

**Ryc. 1.** Bolid pułtuski na rycinach z okresu spadku wg: A – Kramsztyka (1899), B – Jędrzejewicza (1907), C – Kramsztyka (1868)  
**Fig. 1.** The Pułtusk bolide in figures from time of fall according to: A – Kramsztyk (1899), B – Jędrzejewicz (1907), C – Kramsztyk (1868)

wszystkich liczących się na świecie. Wiele muzeów do dziś posiada na swoim stanie setki okazów ([http://wiki.meteoritica.pl/index.php5/Pultusk\\_\(Pu%C5%82tusk\)](http://wiki.meteoritica.pl/index.php5/Pultusk_(Pu%C5%82tusk))). Większość z nich jest mała, o wadze kilku gramów, zwana „grochem pułtuskim”. Największe pojedyncze meteoryty znajdują się w Natural History Museum w Londynie (9095 g), w Muzeum Ziemi PAN w Warszawie (8100 g) oraz Natur Historisches Museum w Berlinie (8070 g) (Piłski, 1992).

Dokładnie 150 lat po spadku autorzy zakończyli pracę nad pierwszym etapem opracowywania wyników badań nowych okazów meteorytu pułtuskiego. Ich efekty pragniemy zaprezentować w niniejszym artykule. Niecodziennosc badanych przez nas okazów polega na tym, że stanowią one dwa pasujące do siebie fragmenty, które prawdopodobnie jeszcze kilka metrów nad powierzchnią Ziemi stanowiły jedno ciało (ryc. 3). Znalezienie dwóch, ale pasujących kształtem do siebie okazów, leżących w odległości ok. 1 m (Kuś, 2015) wskazuje, że meteoryt ten rozpadł się na bardzo niewielkiej wysokości albo podzielił się na dwie części dopiero na skutek uderzenia o powierzchnię. Wcześniej jednak musiał być już pęknięty, gdyż upadł na miękki grunt – przybrzeżne zarośla nad Narwią, wg relacji znalazcy (Kuś, 2015). Były to dwa okazy znalezione na terenie nadrzecznej łąki, jeden na głębokości ok. 18–20 cm i niecały metr dalej, nieco niżej, bardziej w szuwarach drugi – leżący na głębokości ok. 16–17 cm. Jego barwną relację ze znalezienia tych okazów meteorytu Pułtusk można przeczytać w czasopiśmie *Meteoryt* (Kuś, 2015).

Do badań został autorom przekazany, przez P. Kusia, jeden z tych dwóch okazów znalezionych nad Narwią w dniu 23 listopada 2015 r. niedaleko Starego Sielca.

## METEORYT PUŁTUSK

Meteoryt kamienny Pułtusk jest oficjalnie zaliczony do zbrekcyjowanych chondrytów zwyczajnych H5 o indeksie szokowym S3 (Stöffler i in., 1991; Grady, 2000; Koblitz, 2006). Aktualnie (wg stanu na 31.01.2018 r.) jest on jednym z 49 478 chondrytów sklasyfikowanych i zatwierdzonych przez *Nomenclature Committee of the Meteoritical Society – International Society for Meteoritics and Planetary Science*, w tym jednym z 22 332 chondrytów zwyczajnych grupy H i jednym z 9011 w typie petrograficznym H5 (<https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php>).

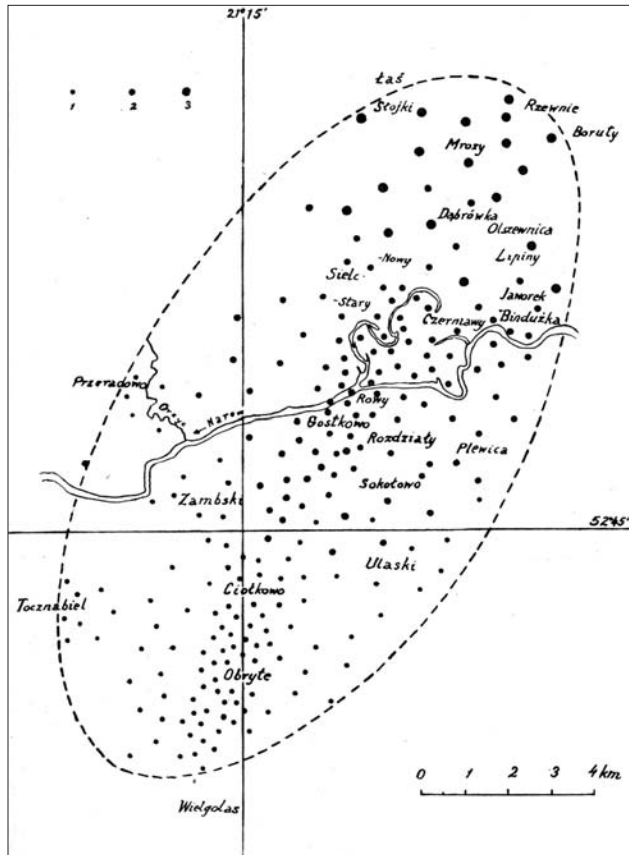
Mimo że historia badań meteorytów deszczu pułtuskiego liczy sobie już ponad 150 lat i wciąż są prowadzone nowe prace, a materiał tego chondrytu jest często wykorzystywany do badań różnych aspektów genezy i rozwoju materii ciał macierzystych chondrytów, to nadal nie doczekały się one jednego kompleksowego opracowania, podsumowującego wszystkie wyniki. W roku 2013 ukazała się praca doktorska A. Krześcińskiej, w której autorka opracowała znaczną część wcześniejszych badań, i może ona pretendować do miana monografii meteorytu pułtuskiego (Krześcińska, 2013). Niestety nie jest ona opublikowana, a sama autorka wciąż przedstawia kolejne wyniki badań własnych, rozszerzające zakres poprzedniego opracowania monograficznego (Krześcińska, Fritz, 2014; Krześcińska i in., 2015; Krześcińska, 2016, 2017, 2018). Dlatego też niezwykle trudno jest dokonać syntetycznego przeglądu dotychczasowych wyników badań meteorytów z deszczu pułtuskiego.

Na podstawie pracy doktorskiej Krześcińskiej (2013) można stwierdzić, że od lat 50. XX w. meteoryt Pułtusk był przedmiotem wielu badań, co jest związane z jego powszechną dostępnością w wielu kolekcjach na świecie. Zwykle nie był on jednak głównym przedmiotem badań, ale jednym z wielu meteorytów służących analizie najczęściej wąskich problemów badawczych. Z tego względu skład mineralny, chemiczny i struktura meteorytu pułtuskiego stanowiła temat zaledwie kilku prac (Lang, Kowalski, 1971; Manecki, 1972; Waleńczak, 1977a, b, c; Siemiątkowski, 2004). Dlatego autorzy pragną dołożyć własną, niewielką cegiełkę do poznania składu mineralnego, chemicznego i petrografii meteorytu Pułtusk. Publikując wyniki analiz, chcielibyśmy udostępnić materiał źródłowy dla innych, bardziej obszernych lub detalicznych studiów różnorodnej problematyki związanej z genezą i ewolucją zarówno meteorytu pułtuskiego, jak i jego ciała macierzystego, bądź też wczesnej ewolucji materii w naszym układzie planetarnym.

Procesy deformacji i metamorfizmu meteorytu Pułtusk były natomiast poddane obszernym badaniom przez Krze-



sińską (2013). Jej szerokie opracowanie zaowocowało także kolejnymi publikacjami o tym meteorycie, które dotyczyły przede wszystkim ewolucji oraz procesów metamorficznych i zderzeniowych jego ciała macierzystego



**Ryc. 2.** Elipsa rozrzutu deszczu pułtuskiego. Mapa wykonana przez Samsonowicza (1952). Zaznaczono meteoryty o masie: 1 – 0,001–0,2, 2 – 0,2–2,0, 3 – 2,0–9,0 kg

**Fig. 2.** Strewn field of Pułtusk meteorites shower. The map prepared by Samsonowicz (1952). There are marked specimens with mass: 1 – 0,001–0,2, 2 – 0,2–2,0, 3 – 2,0–9,0 kg

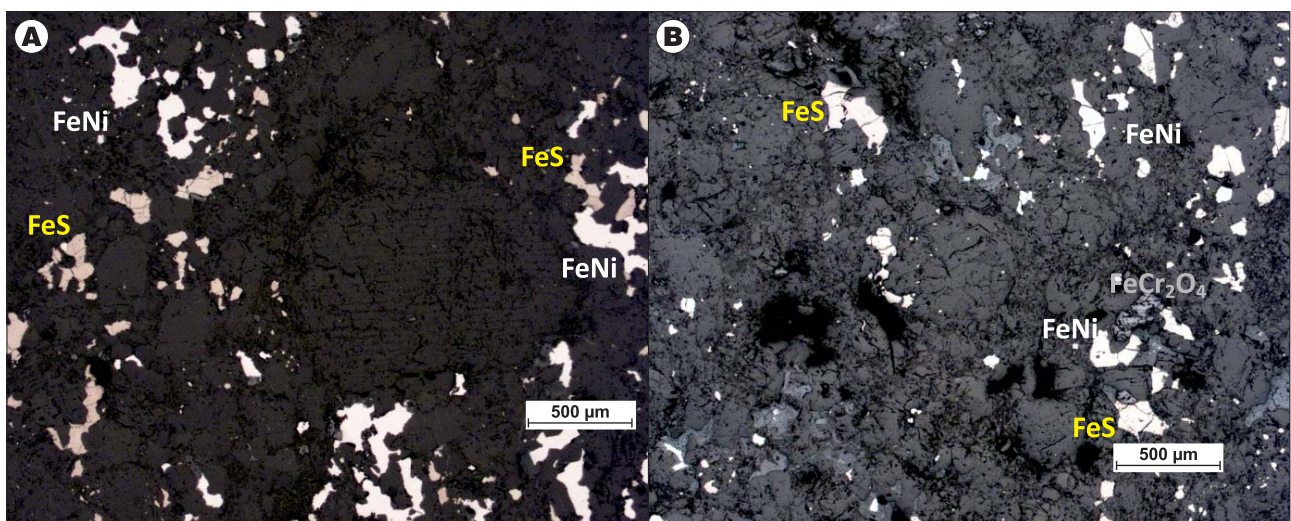
(Krzysińska, Fritz, 2014; Krzysińska i in., 2015; Krzysińska, 2016, 2017). Natomiast aspekty związane z procesem ziemskiego wietrzenia okazów meteorytu Pułtusk przedstawili Gurdziel i Karwowski (2009a, b).

Chondryty zwyczajne grupy H, w tym Pułtusk, stanowią 34% wszystkich docierających do powierzchni Ziemi meteorytów (Lipschutz i in., 1989; Burbine i in., 2002). Pochodzą one z nieznanego ciała macierzystego lub z kilku takich ciał, które znajdują się w pasie planetoid. Być może takim ciałem macierzystym dla chondrytów H jest planetoida 6 Hebe, która jest przedstawicielem asteroid typu S (IV).



**Ryc. 3.** Dwa pasujące do siebie fragmenty meteorytu Pułtusk, znalezione przez P. Kuś 23.11.2015 r. niedaleko Starego Sielca nad Narwią. Doskonale widoczna czarna skorupa obtopieniowa z rdzawymi śladami, które wskazują na utlenianie żelaza w warunkach ziemskiego klimatu umiarkowanego przez okres niemal 148 lat. Z mniejszego okazu autorzy odcięli materiał do badań. Fot. P. Kuś

**Fig. 3.** Picture of two fitted fragments of the Pułtusk meteorite found by P. Kuś on 23<sup>th</sup> November 2015 near Stary Sielc on the Narew River. The black fusion crust with rusted marks indicate weathering of iron in a terrestrial temperate climatic zone during 148 years. From this smaller specimen, the material for further research was cut by the authors. Photo by P. Kuś



**Ryc. 4.** Występowanie minerałów nieprzezroczystych w świetle odbitym. A – żółte ziarna troilitu (FeS) oraz białe ziarna stopu FeNi, z widoczną w centralnej części chondrą belkową oliwinową (BO), B – białe ziarna stopu FeNi, jasnożółte ziarna troilitu (FeS) oraz szare ziarna chromitu ( $FeCr_2O_4$ ) o wyraźnym reliefie, w centralnej części widoczne są dwie chondry

**Fig. 4.** Microphotographs of opaque minerals in reflected light. A – troilite (FeS) grains in yellow and FeNi alloy grains in white, with a barred olivine (BO) chondrule in the central part of microphotograph; B – FeNi alloy grains in white, troilite (FeS) grains in light yellow and chromite ( $FeCr_2O_4$ ) grains in gray with high relief, in the central part of microphotograph two chondrules are visible

Ciało macierzyste przypisano do grupy chemicznej chondrytu na podstawie analizy widm światła odbitego od powierzchni planetoidy i porównania go z widmem światła odbitego od powierzchni chondrytów grupy H (Gaffey, Gilbert, 1998).

W składzie mineralnym chondrytu Pułtusk do lat 60. XX w. stwierdzono obecność oliwinu, piroksenu o składzie bronzytu, plagioklazu, kamacytu, a w latach 70. także taenitu, troilitu, chromitu, chalkopirotynu, miedzi rodzimej i mackinawitu. Główną cechą strukturalną tego meteorytu jest jego zbrekcowanie opisane już w XIX w. (Brezina, 1895; Prior, 1923; Leonard, 1956; Manecki, 1972; Siemiątkowski, 2004; Krześcińska, 2013; Krześcińska, Fritz, 2014). Wyniki najnowszych badań Krześcińskiej (2013, 2016, 2017) oraz Krześcińskiej i Fritza (2014), a także Krześcińskiej i in. (2015) wykazują, że jest on chondrytem typu H4-6, lokalnie posiadającym cechy skały niezrównoważonej typu H3.8. Dominuje materiał typu H4/H5, w którym są osadzone klasty typu H5 i H6. W brekcji pułtuskiej rozpoznano także ksenolity materiału chondrytowego typu CM2.6 (Krześcińska, Fritz, 2014). Meteoryt Pułtusk doświadczył dwuetapowego metamorfizmu. Pierwszy progresywny etap równoważenia był zależny zapewne od głębokości na ciele macierzystym i doprowadził do powstania skały typu H5 i H6 oraz H4/H5, odpowiednio w temperaturach ok. 730 i 700°C (Krześcińska, 2016). Drugi etap był retrogresywny i także prowadził do równoważenia chemicznego minerałów. Mimo to w skale są nadal obecne klasty niezrównoważonej skały typu H3.8.

Stopień deformacji zderzeniowej meteorytu Pułtusk został określony na S2–S3. Są w nim zapisane ślady działania co najmniej trzech impaktów. Najstarsze zdarzenie impaktowe o sile S4–S5 nastąpiło jeszcze w czasie akrecji materiału, ok. 4,49–4,54 Ga (Krześcińska, 2017). Kolejny impakt wywołał skutki charakterystyczne dla stopnia szokowego S5 i jest prawdopodobnie związany z czasem późnego wielkiego bombardowania w Układzie Słonecznym, co miało miejsce ok. 3,7 Ga (Krześcińska, 2018). Najmłodszy impakt jest najlepiej odzwierciedlony w strukturze chondrytu pułtuskiego, jednak wiek tego wydarzenia pozostaje nieustalony. Prawdopodobnie doszło do skośnego zderzenia, które wywołało falę uderzeniową o sile S2/S3 (Krześcińska i in., 2015). Wydarzenie to mogło być zderzeniem ciała macierzystego grupy H z ciałem o składzie chondrytu węglistego CM (Krześcińska, 2013).

Przedmiotem badań były również właściwości fizyczne chondrytu Pułtusk. Określono m.in. gęstość szkieletu ziarnowego, która wynosi  $3,79 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$ , gęstość objętościową o wartości  $3,61 \pm 0,16 \text{ g/cm}^3$  oraz podatność magnetyczną  $\text{Log } \chi$  równą  $5,35 \pm 0,07$  (Consolmagno i in., 2006). Natomiast Żbik i Self (2005) określili porowatość na 3,4% oraz objętość zajmowaną przez ziarna metali na 7,7%. Szurgot (2015) wyznaczył średni ciężar atomowy chondrytu Pułtusk, który wynosi  $A_{\text{mean}} = 24,75$  oraz stosunek atomowy Fe/Si, który jest równy 0,8017.

## METODY BADAŃ I MATERIAŁ PODDANY ANALIZOM

Autorzy odcięli próbki do badań z mniejszego ze znalezionych przez P. Kusia okazów. Przywieziony fragment przed cięciem piłą obrotową Polandmet Silver Blade VI, o grubości tarczy diamentowej wynoszącej 0,3 mm, miał masę 288,16 g. Po odcięciu zwrócony znalazczy okaz ważył 248,26 g. Do badań odcięto 4 fragmenty:

- małą piętękę o masie 8,10 g i wymiarach:  $34 \times 24 \times 5 \text{ mm}$ ,
- mniejszą płytkę – 3,47 g,  $41 \times 25 \times 1 \text{ mm}$ ,
- większą płytkę – 5,73 g,  $47 \times 27 \times 1,5 \text{ mm}$ ,
- dużą płytkę – 15,02 g,  $55 \times 30 \times 3 \text{ mm}$ .

Następnie przecięto odcięte płytki i podzielono je w sposób umożliwiający wykonanie preparatów do różnych badań. W wyniku cięcia zostały przygotowane: 4 płytki do wykonania preparatów mikroskopowo-mikrosondowych o masach: 2,43, 2,43, 1,92 oraz 1,48 g, 2 fragmenty do badań właściwości fizycznych oraz do badań izotopowych: ogryzek o masie 3,83 g i ściniek o masie 0,70 g, a także 1 duży fragment do badań uśrednionego składu chemicznego, który stanowi płytka o masie 11,12 g. Płytkę tę następnie skruszono i zmielono przy użyciu kruszarki BB51 i młynka PM100 firmy Retsch. Wykorzystano szczęki kruszarki i okładziny wykonane z tlenku cyrkonu, a okładziny młynka i kulki do mielenia materiału chondrytu z tlenku glinu. Masa zmielonej próbki wynosi 10,87 g. Próbką ta jest przeznaczona do wykonania analiz uśrednionego składu pierwiastkowego przy zastosowaniu metody ICP MS. Badania te jeszcze nie zostały wykonane, podobnie jak i badania izotopowe oraz właściwości fizycznych. Pozostawiono także reper (zapas) w postaci piętki o masie 8,09 g.

Analizę mikroskopową wykonano przy użyciu mikroskopu Nikon Eclipse LV100PL, który umożliwia obserwację zarówno w świetle spolaryzowanym przechodzącym, jak i odbitym z możliwością rejestracji obrazu. Wykorzystując ten mikroskop, autorzy opracowali także zakres badań składu chemicznego minerałów w mikroobszarze. Badania te wykonano na mikrosondzie Cameca SX100 w Bratysławie (Štátny Geologický Ústav Dionýza Štúra). W celu oznaczenia składu chemicznego ziaren stopu FeNi i siarczków pracowano przy natężeniu prądu wynoszącym 10 nA. Napięcie prądu wynosiło 25 keV, natomiast wielkość punktu pomiaru 6  $\mu\text{m}$ . W przypadku analiz krzemianów natężenie wiązki wynosiło 20 nA, napięcie 15 keV, a rozmiar wiązki 3  $\mu\text{m}$ . Fosforany były analizowane przy natężeniu wiązki 20 nA, napięciu 15 keV i rozmiarze wiązki 5  $\mu\text{m}$ .

## WYNIKI BADAŃ MINERALOGICZNO- -PETROLOGICZNYCH NOWYCH OKAZÓW METEORYTU PUŁTUSK

Obserwacje makroskopowe płytek cienkich pozwoliły stwierdzić brak widocznego zróżnicowania struktury meteorytu. Autorzy nie zaobserwowali stref świadczących o zbrekcowaniu, nie znaleźli także wyraźnych granic, które mogłyby świadczyć o złożonej z różnych klastów budowie chondrytu. Oznacza to, że mieliśmy do czynienia z jednorodnym fragmentem, obejmującym zapewne tylko jeden typ petrograficzny chondrytu Pułtusk. Odcięta przez autorów piętka jest mocno zwietrzała na całej zewnętrznej powierzchni. Jej wnętrze ukazuje wyraźną granicę strefy wietrzenia do głębokości ok. 3–4 mm. Obserwacje te są zgodne z wynikami badań Gurdziel i Karwowskiego (2009a, b), wg których zewnętrzne partie meteorytu Pułtusk charakteryzują się stopniem wietrzenia W2–W3, podczas gdy wnętrze stopniem W1.

Doskonale widoczna jest czarna, miejscami pokryta brązowymi wodorotlenkami żelaza, skorupa obtopieniowa o grubości  $<0,5 \text{ mm}$ . Na udostępnionym nam do badań okazie nie wykazuje ona ukierunkowania, a więc badany meteoryt nie jest orientowany.

Makroskopowo nie stwierdzono obecności wyraźnych chondr. Na kilku oglądanych powierzchniach przecięcia

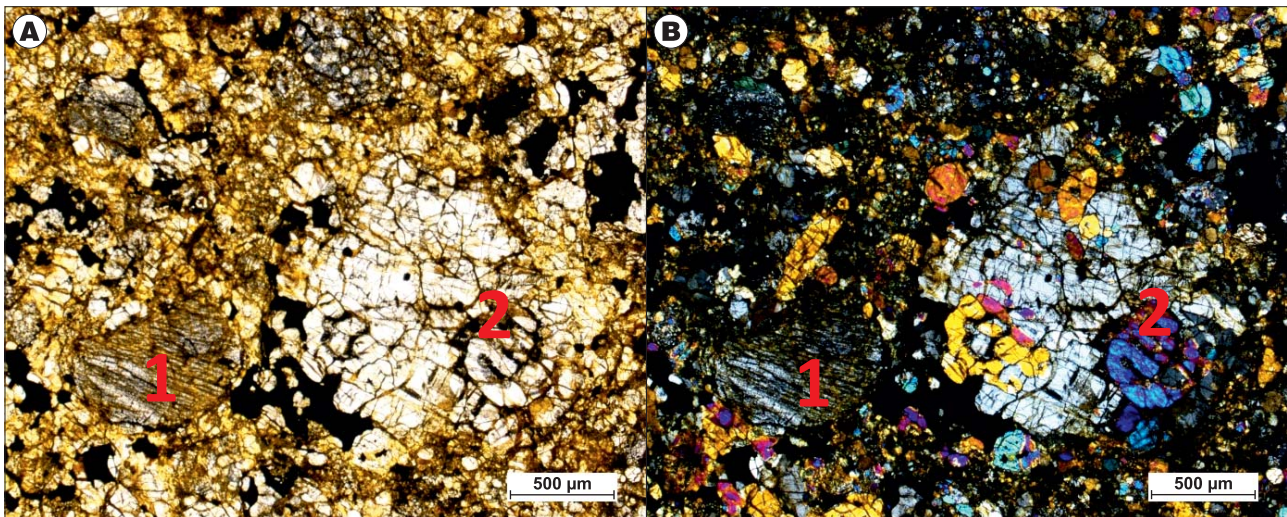


zauważono prawdopodobnie jedynie jedną wyraźną chondrę. Stwierdzono dużą ilość ziaren troilitu i metalu. Niezbyt silna reakcja na magnes wskazywała, że zawartość metalu nie jest jednak duża, ale jest to tylko orientacyjny pomiar jakościowy. Na tym etapie badań autorzy nie wykluczali nawet, że mają do czynienia z chondrytem zwyczajny grupy L. W trakcie odcinania próbek do badań były wyraźnie wyczuwalne skokowe różnice w twardości skały, co różni ten chondryt od przeciętnych chondrytów zwyczajnych (niezbrekcyjowanych). Nie stwierdziliśmy jednak na powierzchniach przecięcia jakichkolwiek niejednorodności powierzchniowych, tzn. że meteoryt ten nie jest brekcją, przynajmniej w skali badanego okazu. Widoczne są jedynie nieliczne, cienkie żyłki szokowe. Podsumowując, mogliśmy stwierdzić, że mamy do czynienia z materiałem chondrytowym wysoko przeobrażonego typu petrograficznego, prawdopodobnie 5 lub nawet 6.

W obrazie mikroskopowym autorzy stwierdzili dużą liczbę utlenionych ziaren FeNi. Niektóre z nich były utle-

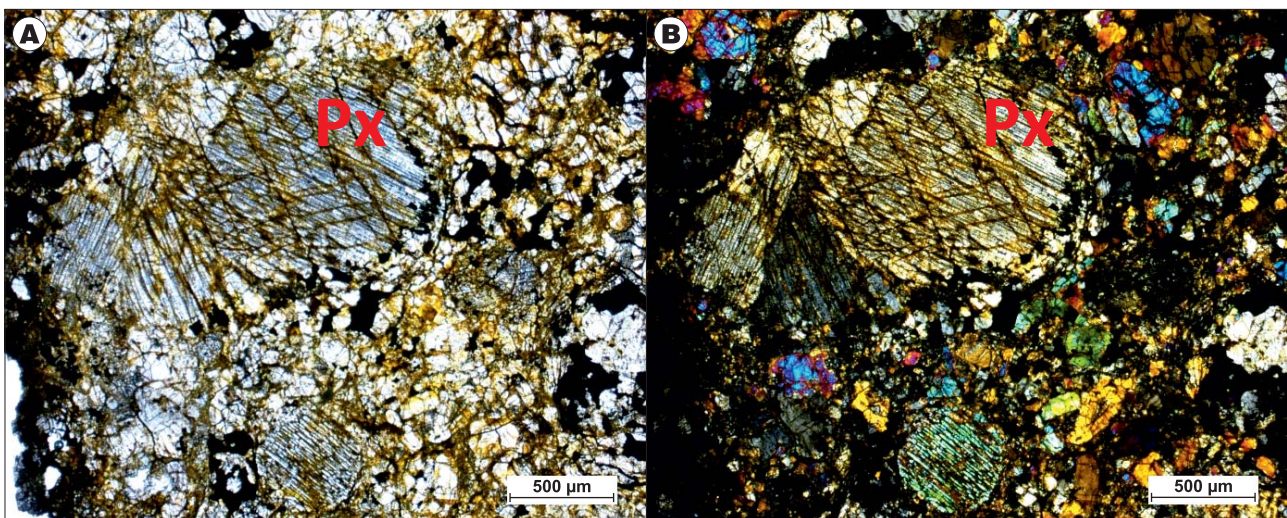
nione nawet całkowicie i zamiast rodzimego metalu (FeNi) pod mikroskopem były widoczne tlenki i wodorotlenki żelaza. Część z nich posiada jednak wewnątrz fragmenty nieutlenionego FeNi, a niektóre ziarna stopu FeNi są utlenione w niewielkim stopniu i tylko na brzegach. Troilit (FeS) utleniony jest tylko nieznacznie (ryc. 4). Wodorotlenki i tlenki żelaza wchodzą w spękania krzemianów i tworzą krótkie żyłki między ziarnami metalu (FeNi), siarczków (FeS) i krzemianów. Wskazuje to na stopień wietrzenia W2. Zaskakujące jest stwierdzenie tak niskiego stopnia wietrzenia zważywszy na klimat i środowisko, w jakim leżał badany fragment meteorytu przez niemal 150 lat. Fakt ten może tłumaczyć izolująca rola skorupy obtopieniowej, która zabezpiecza wnętrze okazów meteorytu Pułtusk przed penetracją przez wodę gruntową (Gurdział, Karwowski, 2009a).

W obrazie mikroskopowym zaobserwowano również silnie spękane ziarna krzemianów zarówno piroksenów (Px), jak i oliwinów (Ol) (ryc. 5, ryc. 6A i B), a niektóre



**Ryc. 5.** Fragment chondry promienistej piroksenowej (1) oraz oliwinowej chondry zespolonej (2) o zatartych granicach z matrix z silnie spękanyimi kryształami oliwinów i piroksenów w świetle spolaryzowanym przechodzącym bez skrzyżowanych nikoli (A) oraz przy skrzyżowanych nikolach (B)

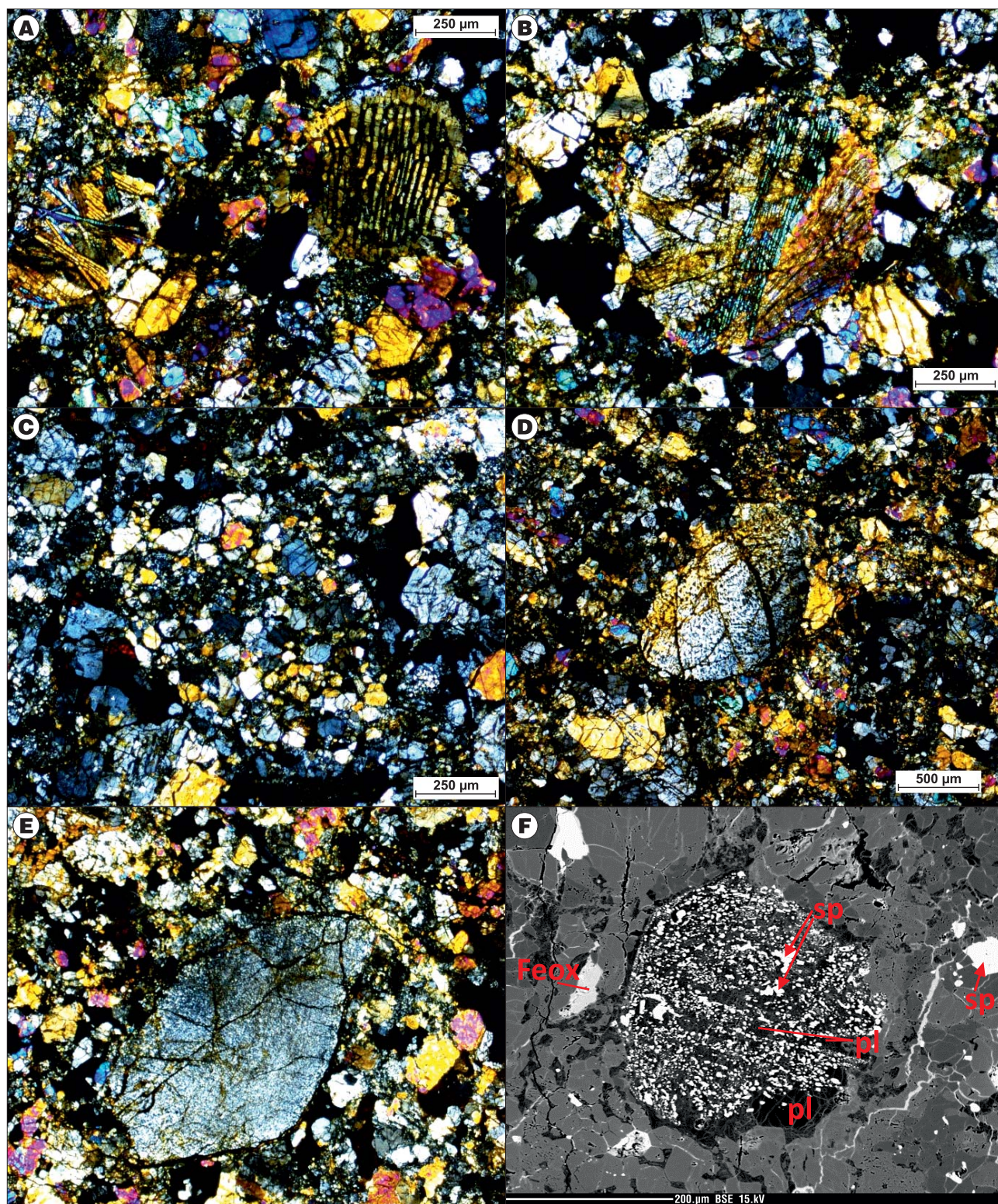
**Fig. 5.** Microphotographs of a part of radial pyroxene chondrule (1) and olivine compound chondrule (2) poorly delineated with strongly fractured olivine and pyroxene crystals in transmitted polarized light without crossed polars (A) and with crossed polars (B)



**Ryc. 6.** Spękania kryształu piroksenu (Px) w świetle spolaryzowanym przechodzącym bez skrzyżowanych nikoli (A) oraz przy skrzyżowanych nikolach (B)

**Fig. 6.** Microphotographs of deformation features of pyroxene (Px) in transmitted polarized light without crossed polars (A) and with crossed polars (B)





**Ryc. 7.** Elementy mikrostrukturalne chondrytu Pułtusk w świetle spolaryzowanym przechodzącym przy skrzyżowanych nikolach (A–E). **A** – chondra belkowa oliwinowa; **B** – chondra promienista piroksenowa mozaikowa; **C** – chondra porfirowa piroksenowo-oliwinowa; **D** – fragment chondry promienistej piroksenowej/szklistej (?); **E** – rzadko spotykany klast szklawy w obrębie matrix; **F** – agregaty chromitowo-plagioklazowe w obrazie BSE

**Fig. 7.** Microphotographs of microstructural elements of the Pułtusk chondrite A–E in transmitted polarized light with crossed polars. **A** – barred olivine chondrule; **B** – mosaic radial pyroxene chondrule; **C** – porphyritic olivine-pyroxene chondrule; **D** – fragment of radial pyroxene chondrule/glass chondrule (?); **E** – rare clast of glass within matrix, **F** – chromite-plagioclase aggregates in BSE image

kryształy Px wygaszają faliście światło. Kryształy Ol natomiast zwykle wygaszają światło prosto. Wskazywać to może na bardzo niski stopień szokowy – S1, lub najwyżej S2/S3. Zróżnicowany stopień szokowy jest jedną z charakterystycznych cech chondrytu Pułtusk, odzwierciedlającą

skomplikowaną historię deformacji jego ciała macierzystego (Krzesińska, 2013).

Granice chondr w większości przypadków są niewidoczne, chondry pozostają nieodróżnialne od matrix (ryc. 5, 7B, 7C). Rzadko występują chondry wyraźnie odróżnialne



od matrix, ze stopniowym przejściem w matrix (ryc. 7A i 7D). Taka cecha strukturalna pozwala określić typ petrograficzny badanego meteorytu na 5. Ten typ petrograficzny potwierdza także wielkość wtórnych ziaren skalenia (20–50 µm) oraz obecność skośnie wygaszających światło kryształów piroksenów. Pozostałe kryteria Van Schmussa i Wooda (1967), takie jak: jednorodność składu oliwinu, zawartość Ni w troilicicie, obecność taenitu oraz krystaliczne matrix, także potwierdzają przynależność badanego okazu do typu petrograficznego 5. Stwierdzone pod mikroskopem chondry to najczęściej chondry piroksenowe, znacznie rzadziej piroksenowo-oliwinowe i oliwinowe. Wyróżniono wiele ich odmian strukturalnych: PO (porfirowe oliwinowe), POP (porfirowe oliwinowo-piroksenowe;

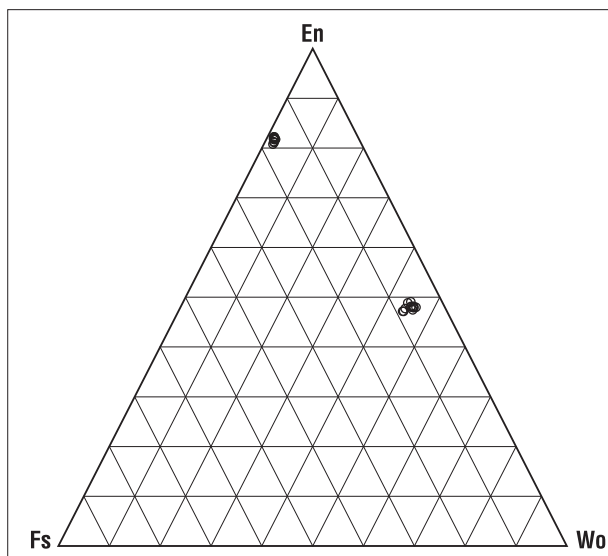
**Tab. 1.** Porównanie wyników analiz składu chemicznego oliwinów przeprowadzonych przez autorów z uzyskanymi przez Krześcińską (2013). Zacieniowano wyniki analiz Krześcińskiej (2013) najbliższe wynikom otrzymanym przez autorów

**Table 1.** Comparison of the results of chemical composition of olivine analysis carried out by authors with those obtained by Krześcińska (2013). The results shaded are the most similar to those by Krześcińska (2013)

		Fo	Fa	Te
		[% wag.] / [wt.%]		
<b>Wyniki analiz autorów</b> <i>Authors' results</i>	min.	79,62	18,39	0,46
	max.	81,14	19,91	0,60
	średnia average	80,28	19,21	0,52
<b>H3.8</b>	min.	80,55	18,87	0,42
	max.	84,78	14,80	0,58
	średnia average	82,40	17,10	0,53
<b>H4/5</b>	min.	80,06	17,44	0,50
	max.	81,61	19,25	0,57
	średnia average	80,75	18,53	0,53
<b>H5 + H6</b>	min.	79,69	17,56	0,48
	max.	81,94	19,82	0,56
	średnia average	80,67	18,81	0,52

ryc. 7B), BO (belkowe oliwinowe; ryc. 7C), GO (granularne oliwinowe), RP (promieniste piroksenowe; ryc. 4), a być może także BP(?) (belkowe piroksenowe?) oraz promienistą piroksenową mozaikową, z kilkoma centrami krystalizacji (ryc. 7A). Matrix jest krystaliczne, zbudowane głównie z kryształów oliwinu, w mniejszym stopniu z piroksenów, a niektóre drobniejsze kryształy oliwinu są automorficzne i wówczas są one również mniej spękane od pozostałych.

Autorzy stwierdzili także obecność kryształów plagioklazów (Pl). Występują one jednak rzadko i są niewielkich rozmiarów (20–50 µm). Kryształy piroksenów (Px) wygaszają światło prosto i są to zapewne rombiczne pirokseny wapniowe (diopsyd), a także niskowapniowy bronzyt.



**Ryc. 8.** Skład kryształów piroksenów na trójkącie Fs-Wo-En przedstawiający występowanie zarówno kryształów wysokowapniowego diopsydu, jak i kryształów piroksenów Mg-Fe (rombicznego bronzytu i jednoskośnego klinohiperstenu)

**Fig. 8.** Ternary diagram for Fs-Wo-En molar content of pyroxene crystals showing both Ca-rich diopside and Mg-Fe pyroxene (rhombic bronzite and monoclinic clinohyperstene)

**Tab. 2.** Porównanie wyników analiz składu chemicznego piroksenów przeprowadzonych przez autorów z uzyskanymi przez Krześcińską (2013). Zacieniowano wyniki analiz Krześcińskiej (2013) najbliższe otrzymanym przez autorów

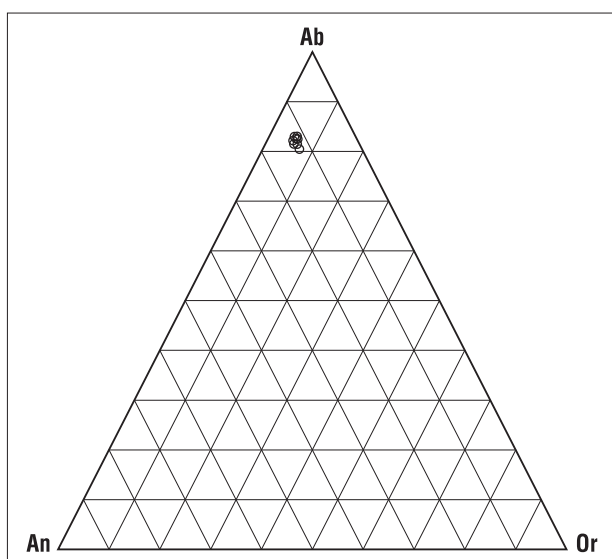
**Table 2.** Comparison of the results of chemical composition of pyroxene analysis carried out by authors those results obtained by Krześcińska (2013). The results shaded are the most similar to those by Krześcińska (2013)

		Niskowapniowy piroksen <i>Low-Ca pyroxene</i>			Diopsyd <i>Diopside</i>		
		En	Fs	Wo	En	Fs	Wo
		[%wag.] / [wt.%]			[%wag.] / [wt.%]		
<b>Wyniki analiz autorów</b> <i>Authors' results</i>	min.	80,79	16,39	1,22	47,17	5,69	44,08
	max.	82,26	17,42	1,85	49,10	8,72	46,32
	średnia average	81,75	16,72	1,53	47,99	6,85	45,16
<b>H3.8</b>	min.	82,02	15,52	0,31	46,71	5,33	46,91
	max.	83,78	17,67	0,70	47,56	5,53	47,97
	średnia average	82,90	16,60	0,51	47,14	5,43	47,44
<b>H4/5</b>	min.	81,30	16,05	0,84	47,33	5,86	44,64
	max.	82,92	17,34	1,45	49,50	6,16	46,51
	średnia average	82,11	16,63	1,26	48,32	5,95	45,74
<b>H5 + H6</b>	min.	81,21	14,24	0,87	47,78	5,66	45,32
	max.	84,76	17,43	1,66	48,20	6,56	48,38
	średnia average	82,24	16,51	1,25	48,02	6,19	45,80

**Tab. 3.** Porównanie wyników analiz składu chemicznego skaleni przeprowadzonych przez autorów z uzyskanymi przez Krześcińską (2013). Zacięniowano wyniki analiz Krześcińskiej (2013) najbliższe wynikom otrzymanym przez autorów

**Table 3.** Comparison of the results of chemical composition of feldspar analysis carried out by authors with results obtained by Krześcińska (2013). The results shaded are the most similar to those by Krześcińska (2013)

		Ab	An	Or
		[% wag.] / [wt.%]		
<b>Wyniki analiz autorów</b> <i>Authors' results</i>	min.	80,48	11,48	4,96
	max.	83,04	12,88	7,20
	średnia average	82,11	12,14	5,75
<b>H3.8</b>	min.	21,12	12,82	0,34
	max.	83,15	78,54	4,03
	średnia average	51,20	47,00	1,80
<b>H4/5</b>	min.	77,07	5,57	3,63
	max.	85,17	14,86	9,26
	średnia average	82,19	11,48	6,33
<b>H5 + H6</b>	min.	80,70	11,04	4,62
	max.	83,31	12,54	6,75
	średnia average	82,56	11,92	5,50



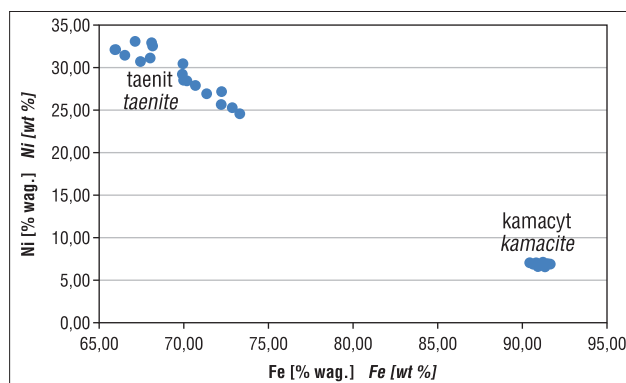
**Ryc. 9.** Skład kryształów skaleni na trójkącie An-Or-Ab przedstawiający występowanie kryształów oligoklaz w badanym okazie chondrytu Pultusk

**Fig. 9.** Ternary diagram for An-Or-Ab molar content of feldspar showing the presence of oligoclase crystals in analysed Pultusk specimen

Niektóre jednak kryształy Px, znacznie rzadziej występujące, wykazują wygaszanie światła skośnie, pod niewielkim kątem ( $< 20^\circ$ ). Są to zapewne kryształy jednoskośnego klinohiperstenu.

Zaprezentowany na rycinie 7F agregat chromitowo-plagioklazowy wskazuje na obecność, także i w badanym przez autorów fragmencie, niewielkich enklaw materiału zrekrystalizowanego po topieniu uderzeniowym.

Autorzy wykonali oznaczenia składu chemicznego minerałów badanego okazu chondrytu Pultusk. Ich wyniki zostały zestawione w załącznikach 1–8 (dostępne w



**Ryc. 10.** Zawartość Fe i Ni w analizowanych ziarnach stopu FeNi, ukazująca wyraźny podział na kamacyt i taenit

**Fig. 10.** Abundance of Fe and Ni in analysed FeNi alloy grains clearly showing kamacite and taenite section

elektronicznej wersji artykułu, <https://www.pgi.gov.pl/>) i mogą stanowić materiał odniesienia lub być materiałem źródłowym do innych badań. Są one istotne ze względu na niewielką liczbę publikowanych danych o składzie chemicznym minerałów meteorytu Pultusk. Załączniki zawierają wyniki analiz składu chemicznego: oliwinów, piroksenów niskowapniowych (bronzytu i klinohiperstenu), piroksenów wysokowapniowych (diopsydu), plagioklazów, chromitu, kamacytu i taenitu, troilitu oraz fosforanów: merrillitu i apatytu. Wszystkie te minerały były już zidentyfikowane w meteorycie Pultusk we wcześniejszych cytowanych publikacjach.

Uzyskane przez nas wyniki składu chemicznego oliwinów mieszczą się w dość wąskim zakresie (średnio 80,28% Fo, 19,21% Fa i 0,52% Te) i są najbardziej zbliżone do oliwinów analizowanych przez Krześcińską (2013) w części meteorytu Pultusk odpowiadającej typom petrograficznym 5 i 6 (średnio 80,67% Fo, 18,81% Fa i 0,52% Te) (tab. 1). Oliwiny skały pultuskiej typu 3.8 mają większe zawartości Fo i co za tym idzie mniejsze Fa, natomiast typu H4/5 nieco większe zawartości Fo i nieco mniejsze Fa. Ogólnie wyniki Krześcińskiej charakteryzują się węższymi zakresami dla Fo i Fa, niż dane uzyskane przez autorów. Wynika to zapewne z mniejszej liczby badań prezentowanych w pracy Krześcińskiej.

Skład chemiczny wszystkich analizowanych przez autorów kryształów piroksenów przedstawiono na trójkątnym diagramie Fs-Wo-En (ryc. 8). Wynika z niego, że w chondrycie Pultusk są obecne zarówno kryształy piroksenów niskowapniowych, bronzytu oraz klinohiperstenu, jak i wysokowapniowego diopsydu. Uzyskane przez nas dane o składzie piroksenów Mg-Fe mieszczą się w zakresie wyników uzyskanych przez Krześcińską (2013) dla fragmentów meteorytu Pultusk typu H4/5. Analizy przeprowadzone przez nas w kryształach diopsydu są natomiast najbardziej zbliżone do wyników Krześcińskiej (2013) uzyskanych dla skały pultuskiej typu H5 + H6 (tab. 2). Pirokseny niskowapniowe w skale pultuskiej typu H3.8 mają większą zawartość części En i mniejszą zawartość części Fs i Wo, natomiast w skale typu H5 + H6 mają skład bardzo zbliżony do typu H4/5, a co za tym idzie do analizowanych przez nas kryształów piroksenu Mg-Fe. Wskazuje to, że badana przez nas materia jest najprawdopodobniej typu H5 i reprezentuje niewątpliwie fragment spadku pultuskiego.



**Tab. 4.** Porównanie wyników analiz składu chemicznego ziaren stopu FeNi przeprowadzonych przez autorów z uzyskanymi przez Krześcińską (2013). Zacięniowano wyniki analiz Krześcińskiej (2013) najbliższe wynikom otrzymanym przez autorów

**Table 4.** Comparison of the results of chemical composition of FeNi alloy grains analysis carried out by authors with results obtained by Krześcińska (2013). The results shaded are the most similar to those by Krześcińska (2013)

		Kamacyt <i>Kamacite</i>					Taenit <i>Taenite</i>				
		Fe	Ni	Co	Cu	Cr	Fe	Ni	Co	Cu	Cr
		[% wag.] / [wt.%]					[% wag.] / [wt.%]				
Wyniki analiz autorów <i>Authors' results</i>	min.	90,43	6,58	0,51	0,00	0,00	65,92	24,58	0,15	0,11	0,00
	max.	91,64	7,13	0,57	0,05	0,02	73,30	33,09	0,23	0,21	0,06
	średnia average	91,03	6,91	0,54	0,01	0,004	69,43	29,47	0,18	0,16	0,01
H4/5	min.	91,44	5,96	0,62	0,00		67,01	26,05	0,26	0,14	
	max.	93,43	6,84	0,71	0,04		74,24	32,65	0,36	0,21	
	średnia average	92,94	6,50	0,66	0,02		70,63	29,35	0,31	0,18	
H5 + H6	min.	91,99	4,58	0,66	b.d.		60,47	33,31	0,22	0,62	
	max.	93,99	6,86	0,82	b.d.		66,34	38,98	0,32	b.d.	
	średnia average	92,98	5,85	0,71	b.d.		63,41	36,15	0,27	0,62	

b.d. – brak danych / no data

**Tab. 5.** Porównanie wyników analiz składu chemicznego troilitu przeprowadzonych przez autorów z wynikami uzyskanymi przez Krześcińską (2013)

**Table 5.** Comparison of the results of chemical composition of troilite analysis carried out by authors with those obtained by Krześcińska (2013)

		Fe	S	Ni	Co
		[% wag.] / [wt.%]			
Wyniki analiz autorów <i>Authors' results</i>	min.	61,40	35,31	0,00	0,00
	max.	63,02	36,30	0,05	0,04
	średnia average	62,41	35,90	0,03	0,02
H4/5	min.	62,76	36,50		0,09
	max.	63,79	36,54		0,11
	średnia average	63,32	36,51		0,10
H5 + H6	min.	63,57	36,40		0,10
	max.	64,43	36,50		0,11
	średnia average	64,00	36,45		0,11

Podobnie jak w przypadku diopsydu, przeprowadzone przez nas analizy składu chemicznego skaleni świadczą, że ich kryształy najbardziej przypominają swym składem skaleni skały typu H5 + H6 badane przez Krześcińską (2013) (tab. 3). Skalenie w skałe typu H3.8 charakteryzują się bardzo dużą zmiennością składu, w skałe typu H4/5 mają co prawda zbliżoną zawartość cząstki Ab, jednak mniejszą cząstki An, a co za tym idzie większą Or w porównaniu z uzyskanymi przez nas wynikami. Skład chemiczny analizowanych przez autorów kryształów skaleni przedstawiono także na trójkątnym diagramie An-Or-Ab (ryc. 9). Wyraźnie wskazuje on, że w badanym fragmencie chondrytu Pułtusk skaleni reprezentowane są przez oligoklaz.

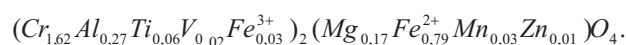
Badane przez autorów ziarna stopu FeNi są zbudowane z kamacytu oraz taenitu (ryc. 10). Autorzy nie wykonali żadnych analiz FeNi w mikroobszarze, których skład mógłby wskazywać na obecność tetrataenitu. Szczegółowy skład kamacytu i taenitu przedstawiono w tabeli 4 i załączniku 6. Uzyskane przez nas wyniki składu chemicznego kamacytu

charakteryzują się mniejszą zawartością Fe (średnio o ok. 2% wag.) od jego zawartości w ziarnach kamacytu analizowanych przez Krześcińską (2013) we fragmentach Pułtusk typu H4/5 czy H5 + H6. Prawdopodobnie jest to skutek zwietrzenia chondrytu i utlenienia części metalu, co potwierdzają niskie sumy analityczne dla ziaren FeNi (zał. 6). Średnia zawartość Ni w analizowanym przez nas kamacycie jest nieznacznie większa niż średnia w typie H4/5 i o 1% większa niż średnia w kamacycie skały typu H5 + H6 (Krześcińska, 2013). Średnia zawartość Co w analizowanym przez nas kamacycie jest mniejsza od średniej zawartości tego pierwiastka w kamacycie skały typu H4/5 czy H5 + H6 analizowanym przez Krześcińską (2013). Ze względu na małą liczbę danych dotyczących koncentracji miedzi w kamacycie uzyskane przez Krześcińską dane nie stanowią wiarygodnego punktu odniesienia dla danych autorów. Autorzy oznaczyli także niewielką zawartość Cr przede wszystkim w ziarnach taenitu (tab. 4).

Średnia zawartość Fe, Ni i Cu w analizowanych przez autorów ziarnach taenitu jest zbliżona do zawartości tych pierwiastków w ziarnach taenitu skały typu H4/5 badanych przez Krześcińską (2013). Jedynie koncentracje Co w ziarnach taenitu uzyskane przez autorów są nieco mniejsze od uzyskanych przez Krześcińską (tab. 4).

Ziarna troilitu analizowane przez autorów charakteryzują się nieco mniejszą zawartością Fe i S, a także Co niż ziarna troilitu skały typu H4/5 i H5 + H6 badane przez Krześcińską (2013) (tab. 5; zał. 7).

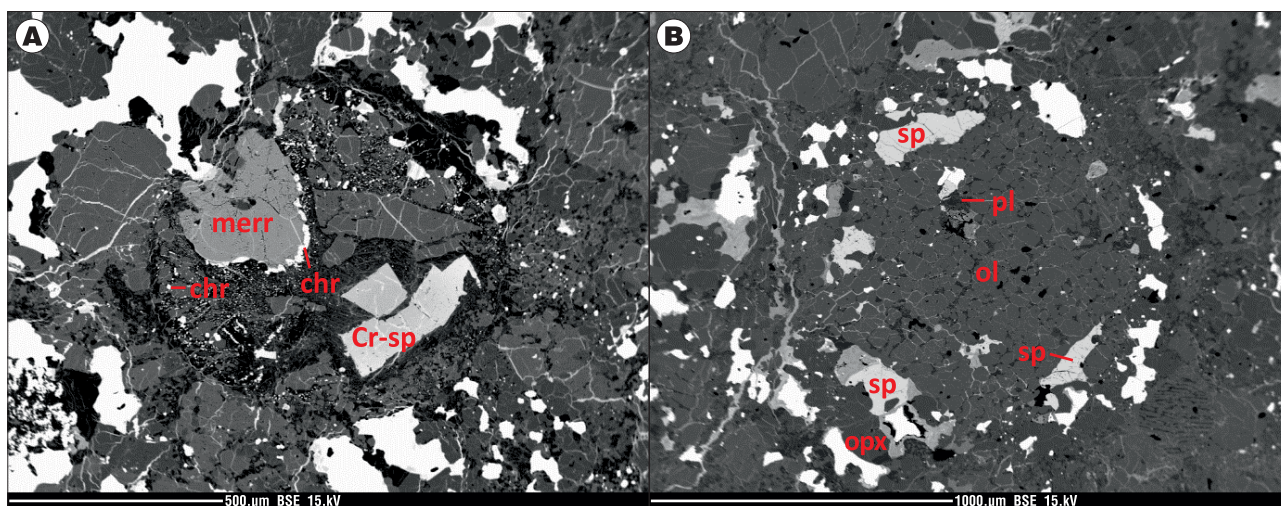
Chromit wykazuje domieszki przede wszystkim glinu i magnezu, a więc zawartość cząstki spinelu właściwego. Uśredniony wzór chemiczny analizowanych przez autorów ziaren chromitu można zapisać jako:



Stwierdzono także obecność spinelu z dużą domieszką cząstki chromitu (picoty) (ryc. 11) o wzorze:







**Ryc. 11.** Obrazy BSE: **A** – chondra spinelowo-plagioklazowa z dużym kryształem merrilitu ( $\text{Ca}_9\text{NaMg}(\text{PO}_4)_7$ ); **B** – chondra oliwinowa porfirowa (PO) z widocznym ziarnem plagioklazu oraz ziarnami chromitu ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ) otaczającymi chondrę, widoczne są kryształy niskowapniowego piroksenu tworzące matrix; merr – merrilit, chr – chromit, Cr-sp – spinel chromowy, sp – spinel, pl – plagioklaz, ol – oliwin, opx – ortopiroksen

**Fig. 11.** BSE images of: **A** – spinel-plagioclase chondrule with a big merrillite ( $\text{Ca}_9\text{NaMg}(\text{PO}_4)_7$ ) crystal; **B** – porphyritic olivine chondrule (PO) with plagioclase grain and chromite ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ) grains surrounded chondrule; Ca-poor pyroxene crystals which constitute matrix are visible; merr – merrillite, chr – chromite, Cr-sp – Chromium spinel, sp – spinel, pl – plagioclase, ol – olivine, opx – low-Ca pyroxene

Dokładne wyniki analiz chromitu i spinelu przedstawiono w załączniku 5. W obrazie BSE stwierdzono obecność agregatów chromitowo-plagioklazowych (ryc. 7F). Są to prawdopodobnie poudzerzeniowe produkty topienia i rekrytalizacji. Autorzy stwierdzili także obecność chondr spinelowo-plagioklazowych, które być może reprezentują materię chondrytową niezrównoważonego typu petrograficznego H3. Wśród obecnych w nich minerałów występują kryształy spineli chromowych o składzie zbliżonym do picotyту (zał. 5, sp#5 i sp#6). Zawierają one także fosforany (ryc. 11), których skład chemiczny wskazuje, że są to kryształy merrilitu i apatyту (zał. 8).

## WNIOSKI

Znalezione przez P. Kusia w 2015 r. meteoryty są niewątpliwie częścią spadku pułtuskiego z 30.01.1868 r. Badany okaz można sklasyfikować jako chondryt zwyczajny H5, S2, W2. Podobnie, jak przedstawiła to obszernie w swojej pracy doktorskiej Krzesińska (2013), autorzy stwierdzili, że badaną skałę charakteryzuje zróżnicowany stopień szokowy – od S1 do S2/3, jak również obecność agregatów chromitowo-plagioklazowych, będących produktami poudzerzeniowymi. Zidentyfikowano także występowanie chondr spinelowo-plagioklazowych, które prawdopodobnie reprezentują niezrównoważoną materię chondrytową grupy H. Badany przez autorów okaz chondrytu Pułtusk ze względu na swoje cechy petrograficzne można uznać za typ zdefiniowany przez Krzesińską (2013) jako H4/5. Jednak autorzy w badanym okazie nie stwierdzili niektórych cech charakterystycznych dla typu petrograficznego 4, dlatego też uznali badany okaz za reprezentujący typ petrograficzny 5. Ze względu na jednorodny charakter teksturalny badanej skały można stwierdzić, że badany meteoryt nie jest zbrekowany.

W składzie badanego fragmentu chondrytu Pułtusk autorzy zidentyfikowali krzemiany: oliwin, diopsyd, bronzyt i klinohipersten oraz oligoklaz, tlenki: chromit i spinel

chromowy (picotyt), siarczki: troilit, stop FeNi: kamacyt i taenit, a także fosforany: merrilit i apatyt. Skład chemiczny kryształów oliwinu, a także nisko- i wysokowapniowych piroksenów oraz plagioklazów (o składzie oligoklazu) potwierdza, że badany okaz pochodzi ze spadku pułtuskiego i stanowi skałę, którą należy zaliczyć do grupy H, a opisane cechy petrograficzne pozwalają zaliczyć go do typu petrograficznego H5.

Autorzy pragną wyrazić wdzięczność Panu Piotrowi Kusiowi, znalazcy badanych przez nas okazów za ich udostępnienie nauce. Andrzejowi Piłskiemu za ich dostarczenie i wskazówki w czasie makroskopowych oględzin okazów, Jadwidze Białej za nieocenioną pomoc w zilustrowaniu naszego artykułu poprzez dostarczenie nam bogatego materiału. Dziękujemy także za finansowe wsparcie badań pieniędzmi publicznymi, z których korzystaliśmy w ramach zlecenia 0401/0125/17 oraz projektu badawczego 2011/03/N/ST10/05821 finansowanego ze środków NCN. Badania te były realizowane w Zakładzie Geologii i Wód Mineralnych na Wydziale Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej. Autorzy składają również podziękowania za wnikiwe i konstruktywne uwagi recenzentom: Pani dr Agacie Krzesińskiej oraz Panu dr Marianowi Szurgotowi. Ich uwagi w znacznym stopniu pomogły udoskonalić pierwotną wersję artykułu i uniknąć błędów.

## LITERATURA

- BREZINA A. 1895 – Die Meteoritensammlung des K. K. Naturhistorischen Hofmuseum am 1 Mai 1895. Annales des K. K. Naturhistorischen Hofmuseum 10.
- BURBINE T.H., MCCOY T.J., MEIBOM A., GLADMAN B., KEIL K. 2002 – Meteoritic parent bodies: Their number and identification. [W:] Bottke W.F., Cellino A., Paolicchi P., Binzel R.P. (red.), Asteroids III. The University of Arizona Press, 653–667.
- CONSOLMAGNO G.J. SJ, MACKE R.J. SJ, ROCHETTE P., BRITT D.T., GATTACCECA J. 2006 – Density, magnetic susceptibility, and the characterization of ordinary chondrite falls and showers. Meteorit. Planet. Sci., 41 (3): 331–342.
- GAFFEY M.J., GILBERT S.L. 1998 – Asteroid 6 Hebe: The probable parent body of the H-type ordinary chondrites and the IIE iron meteorites. Meteorit. Planet. Sci., 33: 1281–1295.
- GRADY M.M. 2000 – Catalogue of meteorites. Fifth edition. Cambridge University Press, Edinburgh.



- GURDZIEL A., KARWOWSKI Ł. 2009a – Procesy wietrzenia w meteorycie Pułtusk (wstępne wyniki badań). *Acta Sci. Meteorit. Pol.*, 1: 23–27.
- GURDZIEL A., KARWOWSKI Ł. 2009b – Wietrzenie meteorytów na przykładzie Moraska i Pułtuska. *Acta Sci. Meteorit. Pol.*, 1: 28–34. <https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php> (dostęp 31.01.2018). [http://wiki.meteoritica.pl/index.php5/Pultusk\\_\(Pu%C5%82tusk\)](http://wiki.meteoritica.pl/index.php5/Pultusk_(Pu%C5%82tusk)) (dostęp 31.01.2018).
- JĘDRZEJEWICZ J. 1907 – Kosmografia. [W:] Ernst M. (red.), *Biblioteka Matematyczno-Fizyczna, seria III, wydanie drugie*. Czajewicz A., Dickstein S., Warszawa.
- KAMIŃSKA E., KOSIŃSKI J.W. 2009 – Upadek i rozmieszczenie fragmentów meteorytu Pułtusk. *Meteoryt*, 1 (69): 6–9.
- KOBLITZ J. 2006 – MetBase v.7.1. Meteorite Information Database, version 7.1 for Microsoft Windows. CD-ROM.
- KOSIŃSKI J.W. 2007–2008 – Biblioteczka meteorytu Pułtusk – zeszyty. Wyszków.
- KRAMSZTYK S. 1868 – O Aerolitech, Kłosa, 137: 83–85.
- KRAMSZTYK S. 1899 – Komety i gwiazdy spadające. Nakład Gebethnera i Wolffa, Kraków – G. Gebethner i spółka, Warszawa.
- KRZESIŃSKA A. 2013 – Deformacja i metamorfizm meteorytu pułtuskiego. Praca doktorska. ING PAN, Wrocław. Maszynopis.
- KRZESIŃSKA A. 2016 – Thermal metamorphic evolution of the Pułtusk H chondrite breccia – compositional and textural properties not included in petrological classification. *Geol. Quart.*, 60 (1): 211–224.
- KRZESIŃSKA A. 2017 – Contribution of early impact events to metal-silicate separation, thermal annealing, and volatile redistribution: Evidence in the Pułtusk H chondrite. *Meteorit. Planet. Sci.*, 52 (11): 2305–2321.
- KRZESIŃSKA A. 2018 – Klast stopu impaktowego w brekcji pułtuskiej. *Acta Sci. Meteorit. Pol.*, 9: 74–91.
- KRZESIŃSKA A., FRITZ J. 2014 – Weakly shocked and deformed CM microxenoliths in the Pułtusk H chondrite. *Meteorit. Planet. Sci.*, 49 (4): 595–610.
- KRZESIŃSKA A., GATTACCECA J., FRIEDRICH J.M., ROCHETTE P. 2015 – Impact-related noncoaxial deformation in the Pułtusk H chondrite inferred from petrofabric analysis. *Meteorit. Planet. Sci.*, 50 (3): 401–417.
- KUŚ P. 2015 – Wyjątkowe okazy Pułtuska. *Meteoryt*, 4 (96): 10–11.
- LANG B., KOWALSKI M. 1971 – On the possible number and mass of fragments from Pułtusk meteorite shower, 1868. *Meteoritics*, 6: 149–158.
- LEONARD F.C. 1956 – A classificational catalogue of the meteoritic falls of the world. University of California Press.
- LIPSCHUTZ M.E., GAFFEY M.J., PELLAS P. 1989 – Meteoritic parent bodies: Nature, number, size and relations to present-day asteroids. [W:] Bottke W.F., Cellino A., Paolicchi P., Binzel R.P. (red.), *Asteroids II*, The University of Arizona Press, Tucson, 740–777.
- MANECKI A. 1972 – Studium mineralogiczno-petrograficzne meteorytu Pułtusk. *Prace mineralogiczne PAN*, 27: 53–65.
- PILSKI A.S. 1992 – Pułtusk deszcz meteorytów. *Meteoryt*, 4: 11–14.
- PRIOR G.T. 1923 – Catalogue of meteorites. First edition. Trustees of the British Museum. London.
- SAMSONOWICZ J. 1952 – O wieku, pochodzeniu i przypuszczalnej ilości oraz masie meteorytu pułtuskiego (z mapką). *Wiadomości Muzeum Ziemi*, 6 (1): 57–68.
- SIEMIĄTKOWSKI J. 2004 – Chondryt Pułtusk: przykład meteorytowej brekcji wieloskładnikowej (H4 + H5). *Meteoryt*, 2 (50): 26–28.
- STÖFFLER D., KEIL K., SCOTT E.R.D. 1991 – Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55: 3845–3867.
- SZURGOT M. 2015 – Mean atomic weight of Pułtusk meteorite and H chondrites. *Meteorit. Planet. Sci.*, 50 (S1) #5013, p. 318.
- VAN SCHMUS W.R., WOOD J.A. 1967 – A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 31: 747–765.
- WALEŃCZAK Z. 1977a – Defectoscopic observations of primary accretion forms in the Pułtusk meteorite (Poland). *Bul. Acad. Pol. Sci.*, 25: 9–13.
- WALEŃCZAK Z. 1977b – Optical ultramicroscopic observations of vesicles in opaque minerals of the Pułtusk meteorite (Poland). *Bul. Acad. Pol. Sci.*, 25: 15–18.
- WALEŃCZAK Z. 1977c – Liquid phase vesicles in the Pułtusk meteorite (Poland). *Bul. Acad. Pol. Sci.*, 25: 19–22.
- ŻBIK M., SELF P. 2005 – High resolution X-ray microtomography analysis in non-destructive investigation of internal structure in two chondrites. *Mineral. Pol.*, 36 (1): 5–19.

Załączniki 1–8 są dostępne w elektronicznej wersji artykułu na stronie <https://www.pgi.gov.pl/>.

Praca wpłynęła do redakcji 20.03.2018 r.  
Akceptowano do druku 17.05.2018 r.