



Zawartość minerałów FeNi w chondrytach H jako wskaźnik zasobności pozaziemskich skał rudonośnych w wybrane metale

Konrad Blutstein¹, Tadeusz A. Przylibski¹, Katarzyna Łuszczek¹



K. Blutstein



T.A. Przylibski



K. Łuszczek

Concentration of FeNi minerals in H chondrites as an indicator of extraterrestrial ore-bearing rocks wealth in selected metals. *Prz. Geol.*, 66: 776–784; doi: 10.7306/2018.14

A b s t r a c t. Extraterrestrial resources should be the basic sources of materials for the development of humankind civilization in space as well as they could replace the Earth's resources when they would be exhausted. They can be obtained from the planets, their moons or asteroids, primarily NEOs but also from the asteroid belt. This article presents the results of petrographic research on the content of FeNi minerals whose may be a source of iron and nickel, in H type ordinary chondrites: Pułtusk, Chergach, Tamdakht, Gao-Guenie and NWA 4555, which parent body is proba-

bly the 6 Hebe. The results confirm that the volumetric abundance of FeNi minerals in H type chondrites is ca. 8%. Moreover, this study shows the reliability of the reflected-light optical microscopy for determination of ore mineral concentrations in extraterrestrial rocks with weathering grade W0. Taking into account the homogenous spatial distribution of metallic grains (proved by author's microscopic observations) and knowing the amount of FeNi minerals in rocks with H chondrite composition, the amount of potential FeNi resources on H parent bodies can be calculated. It was estimated that the iron resources from Hebe's FeNi minerals would cover 1.3 million years of terrestrial mining production whereas nickel resources would last for approx. 100 milion years. A small NEO asteroid like (143624) 2003 HM₁₆ (2 km in diameter) has resources comparable with 15 months of mining iron production and over 100 years of nickel production at present rate.

Keywords: meteorite, ordinary chondrite, H chondrite, FeNi alloy, extraterrestrial metal resources, H chondrite parent body, 6 Hebe asteroid

W literaturze *science fiction* powszechny jest obraz kopalni eksploatujących złoża surowców na planetach, księżycach i małych ciałach układów planetarnych w Drodze Mlecznej oraz innych galaktykach. Pozaziemskie kolonie górnicze w odległych konstelacjach, a nawet na peryferiach znanego nam Wszechświata są często miejscem akcji filmów i książek tego gatunku. Czy jednak pozaziemskie górnictwo i zasoby surowców poza naszą planetą są nadal obecne we współczesnej cywilizacji i kulturze człowieka tylko w sferze *science fiction*?

Odpowiedź na tak postawione pytanie nie jest ani prosta, ani nie może być jednoznaczna. Niewątpliwie ewolucja gatunku *Homo sapiens* jest związana z pozyskiwaniem surowców i eksploatacją ich złóż. Surowce są potrzebne człowiekowi nie tylko do tworzenia cywilizacji materialnej, ale służą jako tworzywo do wyrażania uczuć i przekazywania duchowych aspektów naszej kultury poprzez sztukę. Źródła surowców, z jakich człowiek może korzystać nie tylko na naszej planecie, są eksploatowane przez dwie gałęzie gospodarki, tj. górnictwo i rolnictwo (z włączeniem w to myślistwa i rybołówstwa). Dostarczają one człowiekowi materiałów niezbędnych do zaspokojenia wszelkich potrzeb. Poza górnictwem i rolnictwem nie ma innych możliwości pozyskania surowców, które byłyby dostępne na Ziemi, czy gdziekolwiek we Wszechświecie.

Wszystkie gatunki poprzedzające nas w historii naszej planety, podobnie jak i człowiek, opanowywały nowe śro-

dowiska, korzystając z tzw. preadaptacji, czyli wykorzystując pewne zdolności i cechy, dzięki którym mogły sprawniej i szybciej, niż inne gatunki rozwijać się w zupełnie nowym środowisku. Takim nowym środowiskiem dla organizmów żywych na przełomie ordowiku i syluru było środowisko lądowe. Planetarna ekspansja naszego gatunku, jak również w mniejszej skali późniejsze rozprzestrzenienie cywilizacji Europejczyków w ostatnim tysiącleciu, były oparte na stosowaniu znanych narzędzi i rozwiązań technicznych oraz technologicznych (preadaptacji) do zaspokojenia wszelkich potrzeb w nowych środowiskach, na nowych kontynentach, z wykorzystaniem lokalnych surowców. Trudności w transporcie surowców, zwłaszcza natury ekonomicznej, mają ogromny wpływ także na współczesny rozwój cywilizacji na Ziemi. Wymuszają one stosowanie w gospodarce przede wszystkim surowców dostępnych lokalnie, jako zwykle najtańszych.

Ciekawość świata jest tą cechą naszego gatunku, która popycha nas ku gwiazdom. Obserwujemy Wszechświat od początku naszego istnienia wszelkimi zmysłami, stosując także wspomagające lub zastępujące zmysły urządzenia. Na początku XXI stulecia współczesnej cywilizacji zaczynamy eksplorować przestrzeń otaczającą naszą planetę – kosmos. Wysyłamy różnorodne urządzenia pozwalające poznawać nowe dla nas środowiska planet i małych ciał Układu Słonecznego, a także Ziemię z orbity. Nie ma jednak wątpliwości, że ostatecznym celem jest umożliwienie

¹ Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Politechnika Wroclawska, Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27; 50-370 Wrocław; Konrad.Blutstein@pwr.edu.pl; Tadeusz.Przylibski@pwr.edu.pl; Katarzyna.Luszczek@pwr.edu.pl

nam osobistego poznawania tych pozaziemskich środowisk. Nasz gatunek stoi na progu cywilizacji globalnej, czyli planetarnej, a więc ograniczonej do jednej planety. Kiedy człowiek zdecyduje się na ekspansję cywilizacyjną poza naszą planetę będzie musiał zaspokajać potrzeby surowcowe, aby przetrwać. Społeczności stale lub długo przebywające poza Ziemią zostaną zmuszone do wykorzystania lokalnych (pozaziemskich) surowców.

Celem autorów niniejszego artykułu jest prezentacja wyników prac dotyczących zawartości minerałów złożowych Fe i Ni w skałach budujących ciała macierzyste chondrytów zwyczajnych grupy H.

PRZEGLĄD DOTYCHCZASOWYCH BADAŃ ZŁÓŻ SUROWCÓW POZAZIEMSKICH

Nie ma obecnie żadnych pozaziemskich środowisk (poza orbitą okołozemską) zamieszkiwanych przez dłuższy czas lub na stałe przez społeczności ludzkie. W związku z tym nie ma konieczności rozwoju pozaziemskiego górnictwa. Powstanie ono zapewne natychmiast po osiedleniu się ludzi poza Ziemią. Obecnie wydaje się, że osiedla ludzkie najwcześniej powstaną na Księżycu lub na Marsie (Zubrin, Wagner, 1997). Może okazać się także, że z powodu grożącego nam globalnego kryzysu surowcowego niezbędne będzie sięgnięcie po surowce pozaziemskie. Niewątpliwie jednak górnictwo pozaziemskie pojawi się wówczas, gdy będzie konieczne zaopatrywanie w surowce kolonii ludzkich na innych niż Ziemia ciałach Układu Słonecznego. Początkowo zapewne stanie się to w jego wewnętrznej części, tj. wewnątrz orbity Jowisza. Bez względu jednak na konkretny scenariusz rozwoju naszej cywilizacji (włączając w to prawdopodobny kryzys surowcowy) niezbędne będzie rozwinięcie pozaziemskiego górnictwa w oparciu o wiedzę z zakresu geologii złóż surowców pozaziemskich. Najważniejszymi surowcami staną się z pewnością surowce energetyczne, a także metaliczne i woda (Przylibski, 2015).

Konieczność rozpoznania zasobów różnorodnych surowców pozaziemskich i rozwoju odpowiednich technik i technologii ich eksploatacji ze złóż poza naszą planetą pojawiła się w świadomości ludzi nauki pod koniec XX w. Początkowo ukazały się publikacje pisane na podstawie ogólnej znajomości zagadnień kosmochemicznych i mineralogicznych, opartych przede wszystkim na wynikach badań meteorytów (McKay i in., 1992; Lewis i in., 1993; Kargel, 1994; Gertsch i in., 1997; Lewis, 1997). Nie licząc Księżyca, dopiero na przełomie XX i XXI w. zaczęliśmy dysponować coraz większym zasobem danych pochodzących z analiz ciał pozaziemskich Układu Słonecznego, wykonanych przez automatyczne sondy i łaziki na powierzchni lub orbitach tych ciał (Sullivan i in., 2002; Clark i in., 2002). Japońska misja Hayabusa dostarczyła nawet bardzo niewielkich ilości materiału skalnego z asteroidy 25143 Itokawa (Tsuchiyama i in., 2011, 2014; Tsuchiyama, 2014). Połączenie wiedzy będącej wynikiem badań meteorytów z dostępem do danych analitycznych powierzchni pozaziemskich ciał Układu Słonecznego oraz informacji z obserwacji astronomicznych pozwoliło zapoczątkować badania z nowej dziedziny wiedzy, tj. planetarnej geologii złożowej (Blair, 2000; Lang, 2011; Przylibski, Łuszczek, 2012; Michel, 2014; Przylibski, 2015; Łuszczek, 2018). Zaczęto prowadzić także badania z zakresu nauk technicznych, dotyczące zagadnień technicznych i technologicznych związanych z eksploatacją w warunkach małej grawitacji, próżni, ekspozycji na promieniowanie kosmiczne,

charakteryzujących środowisko pracy maszyn i robotów przeznaczonych dla pozaziemskiego górnictwa i przeróbki kopalin z uwzględnieniem aspektów ekonomicznych (McKay i in., 1992; Zubrin, Wagner, 1997; Sonter, 1998, 2006; Prado, 2009; Hsu, 2009; Moskowitz, 2010; Badescu, 2013).

Również w Zakładzie Geologii i Wód Mineralnych Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej już na początku XXI w. rozpoczęto badania pozaziemskich surowców mineralnych. Szczególnym zainteresowaniem autorów zostały objęte planetoidy, w tym Planetoidy Bliskie Ziemi (NEA lub NEO, z ang. *Near Earth Asteroid* lub *Near Earth Object*), które są źródłem wielu znanych i dostępnych do badań meteorytów. Wybrane zagadnienia złożowe dotyczą przede wszystkim surowców metalicznych występujących na ciałach macierzystych chondrytów zwyczajnych (Łuszczek, 2011, 2012, 2017, 2018; Łuszczek, Przylibski, 2011, 2013, 2014, 2015; Przylibski, Łuszczek, 2012; Przylibski i in., 2012).

Jednym z podstawowych zagadnień złożowych w badaniach planetoid jest rozpoznanie zasobności skał budujących te ciała Układu Słonecznego w minerały rudne metali. Autorzy wybrali do badań grupę chondrytów zwyczajnych H, która reprezentuje ciała zbudowane ze skał najbardziej bogatych w minerały żelaza i niklu spośród wszystkich chondrytów zwyczajnych. Chondryty H są także jednymi z najczęściej znajdowanych meteorytów na powierzchni Ziemi, stanowiąc 38,9% wszystkich sklasyfikowanych obecnie meteorytów. Według danych na dzień 2 października 2018 r. stanowią one 45,2% wszystkich sklasyfikowanych chondrytów zwyczajnych, których jest 94,2% wśród wszystkich chondrytów. Te ostatnie natomiast stanowią 95,2% wszystkich meteorytów kamiennych, stanowiących 95,9% wszystkich znalezionych na powierzchni Ziemi i sklasyfikowanych meteorytów (The Meteoritical Bulletin Database, 2018). Chondryty zwyczajne grupy H reprezentują skały budujące ok. 10% Planetoid Bliskich Ziemi (NEOs). Wartość tę obliczono na podstawie danych Dunn i in. (2013), wg których 2/3 z NEOs ma skład odpowiadający chondrytom zwyczajnym, z tego 15% chondrytom H. Mineralami rudnymi żelaza i niklu, o wzorze FeNi, obecnymi w składzie chondrytów zwyczajnych grupy H są: kamacyt zawierający 92,5–96,0% wag. Fe i 4,0–7,5% wag. Ni (Maneck, 2004), taenit zawierający 55–75% wag. Fe i 25–45% wag. Ni oraz tetrataenit zawierający 44–52% wag. Fe i 48–56% wag. Ni (Clarke, Scott, 1980). Minerale te zawierają także znaczące domieszki kobaltu i miedzi. Kamacyt chondrytów H zawiera 0,34–0,78% wag. Co i <0,06% wag. Cu, natomiast taenit chondrytów H zawiera od 0,11 do 0,55% wag. Co i 0,13–0,40% wag. Cu, podczas gdy w składzie tetrataenitu może być obecne od 0,11 do 0,18% wag. Co i 0,33–0,38% wag. Cu (Łuszczek, 2017). Clarke i Scott (1980) podają zbliżone zakresy występowania Co i Cu w tetrataenicie (<0,2–2,0% wag. Co i 0,11–0,36% wag. Cu). Kamacyt zrównoważonych chondrytów H zawiera średnio 0,47% wag. Co (0,44–0,51% wag.) (Rubin, 1990).

Za ciała macierzyste chondrytów zwyczajnych uważa się planetoidy typu S (IV) (Beatty i in., 1999; Bus, Binzel, 2002; Lang, 2011). Ciałem macierzystym chondrytów H jest najprawdopodobniej planetoida 6 Hebe (Gaffey, Gilbert, 1998). Mimo że nie znamy większej liczby ciał macierzystych chondrytów H, to mogą nimi być z dużym prawdopodobieństwem także niektóre NEO, m.in.: (16960) 1998 QS₅₂, (99901) 1989 VA, (138524) 2000 OJ₈,

(143624) 2003 HM₁₆, (159857) 2004 LJ (Dunn i in., 2013) oraz inne planetoidy w głównym pasie planetoid, jak np.: (214869) 2007 PA8 (Nedelcu i in., 2014), 148 Galia, 101 Helena, 67 Asia, 57 Mnemosyne, 32 Pomona, 23 Thalia, 14 Irene, 5 Astraea) (Vernazza i in., 2014). Na podstawie badań chondrytów H można wnioskować o formie występowania i zasobności złóż metali na ciałach macierzystych tych meteorytów.

MATERIAŁ I METODY BADAŃ

Do badań wytypowano próbki pięciu chondrytów zwykłych grupy H (tab. 1). Przy wyborze starano się uwzględnić te chondryty, których stopień wietrzenia jest możliwie najmniejszy. Im mniejszy jest stopień wietrzenia chondrytu, tym mniejszy jest wpływ ziemskich czynników atmosferycznych na minerały budujące meteoryt. Dzięki temu mniej zwietrzały materiał jest bardziej charakterystyczny, reprezentatywny dla skał macierzystych chondrytów budujących jego macierzystą planetoidę.

W tabeli 2 zestawiono stopnie zwietrzenia próbek meteorytów przeznaczonych do badań. Najbardziej pożądanym stopniem zwietrzenia próbek (W0) najdokładniej odzwierciedla skład mineralny ciał macierzystych badanych meteorytów. Tak dobry stan zachowania charakteryzuje meteoryty, które na Ziemi znalazły się stosunkowo niedawno i zostały zabezpieczone tuż po spadku lub też nie przeżywały długi czas w środowisku sprzyjającym oddziaływaniu czynników atmosferycznych na meteoryt.

Wraz z czasem składniki mineralne meteorytów, w tym i chondrytów H, ulegają wietrzeniu. W wyniku tego procesu zmniejsza się ich wartość naukowa, gdyż coraz bardziej różnią się od swoich pozaziemskich skał macierzystych. Szczególnie szybko procesom wietrzenia na Ziemi ulegają minerały FeNi, w których metale ulegają utlenieniu, tworząc w klimacie umiarkowanym przede wszystkim wodorotlenki żelaza wzbogacone w nikiel (głównie goethyt, lepidokrokit, akaganeit oraz inne fazy mineralne o zróżnicowanym stopniu uwodnienia), a rzadziej także syderyt (Gurdziel, Karwowski, 2009).

Charakterystyka chondrytów wybranych do badań

Badaniom zostały poddane dwie próbki meteorytu Pułtusk oraz po jednej próbce meteorytów: Chergach, Tamdakht, Gao-Guenie oraz NWA 4555. Próbki były przygotowane w postaci płytek cienkich przystosowanych do badań na mikroskopie petrologicznym zarówno w świetle przechodzącym spolaryzowanym, jak i odbitym.

Spadek meteorytu Pułtusk został zaobserwowany 30.01.1868 r. Meteoryt ten zaliczany jest do grupy chondrytów zwykłych H5. Jego indeks szokowy to S2, zaś stopień zwietrzenia określono na W2. Fragmenty meteorytu Pułtusk można odnaleźć na obszarze 16 km² elipsy rozrzutu, pomiędzy miejscowościami Pułtusk i Różan. Oficjalnie podawana masa tego meteorytu wynosi 250 kg, jednak szacuje się, że całkowita masa może sięgać nawet 2080 kg. Poszczególne okazy meteorytu Pułtusk są zróżnicowane,

Tab. 1. Wyniki pomiarów powierzchni próbek badanych chondrytów H oraz sumarycznej powierzchni występujących w nich ziaren minerałów FeNi

Table 1. Results of H chondrite specimens surface area measurements and their total surface area of FeNi grains

Lp. No.	Nazwa próbki Samples name	Powierzchnia minerałów FeNi Total surface area of FeNi grains [μm ²]	Powierzchnia próbki Surface area of specimen [μm ²]	Objętościowa zawartość procentowa ziaren FeNi Volumetric abundance of FeNi grains [%]
1	Pułtusk (1)	15 368 422	417 535 996	3,72
2	Pułtusk (2)	14 126 443	361 799 841	3,90
3	Chergach	14 387 055	204 634 849	7,03
4	Tamdakht	19 546 435	241 649 100	8,09
5	Gao-Guenie	9 428 020	334 676 889	2,82
6	NWA 4555	6 319 170	226 892 774	2,79

Tab. 2. Zestawienie wyznaczonej zawartości objętościowej minerałów FeNi z typem petrograficznym i stopniem wietrzenia badanych chondrytów H. Wyznaczoną zawartość objętościową odniesiono do danych literaturowych (Grady i in., 2014) dla stopnia wietrzenia W0 chondrytów zwykłych grupy H

Table 2. List of determined volumetric abundance of FeNi minerals with petrographic type and weathering grade of examined H chondrites. Determined volumetric abundance is compared with literature data (Grady et al., 2014) for H chondrites with W0 weathering grade

Lp. No.	Nazwa próbki Samples name	Typ meteorytu Meteorite's type	Stopień zwietrzenia Weathering grade	Wyznaczona objętościowa zawartość procentowa FeNi Determined volumetric abundance of FeNi [%]	Objętościowa zawartość procentowa FeNi wg Grady i in. (2014) Volumetric abundance of FeNi acc. to Grady et al. (2014) [%]
1	Pułtusk (1)	H5	W2	3,72	8
2	Pułtusk (2)	H5	W2	3,90	
3	Chergach	H5	W0	7,03	
4	Tamdakht	H5	W0	8,09	
5	Gao-Guenie	H5	W2*	2,82	
6	NWA 4555	H4	W3	2,79	

* wg Jakubowska i in., 2017

gdyż chondryt ten jest brekcją złożoną z fragmentów reprezentujących materiał H4/5 oraz H5 + H6, z niewielkim udziałem materiału chondrytu węglistego CM (Manecki, 1972; Piłski, 1992; Siemiątkowski, 2004; Kosiński, 2007–2008; Kamińska, Kosiński, 2009; Krzesińska, 2013, 2016, 2017, 2018; Krzesińska, Fritz, 2014; Krzesińska i in., 2015; Przylibski, Łuszczek, 2018).

Spadek meteorytu Chergach został zaobserwowany 2 lub 3 lipca 2007 r. Meteoryt spadł na pustyni w północnej części Mali. Elipsa rozrzutu rozciąga się na długości 20 km na północny wschód od miejscowości Taoudenni. Łączna masa jego znalezionych fragmentów wynosi ok. 100 kg. Podobnie jak Pułtusk, jest zaliczany do grupy chondrytów zwyczajnych H5, o indeksie szokowym S3 oraz stopniu zwietrzenia W0 (Weisberg i in., 2008; The Meteoritical Bulletin Database, 2018).

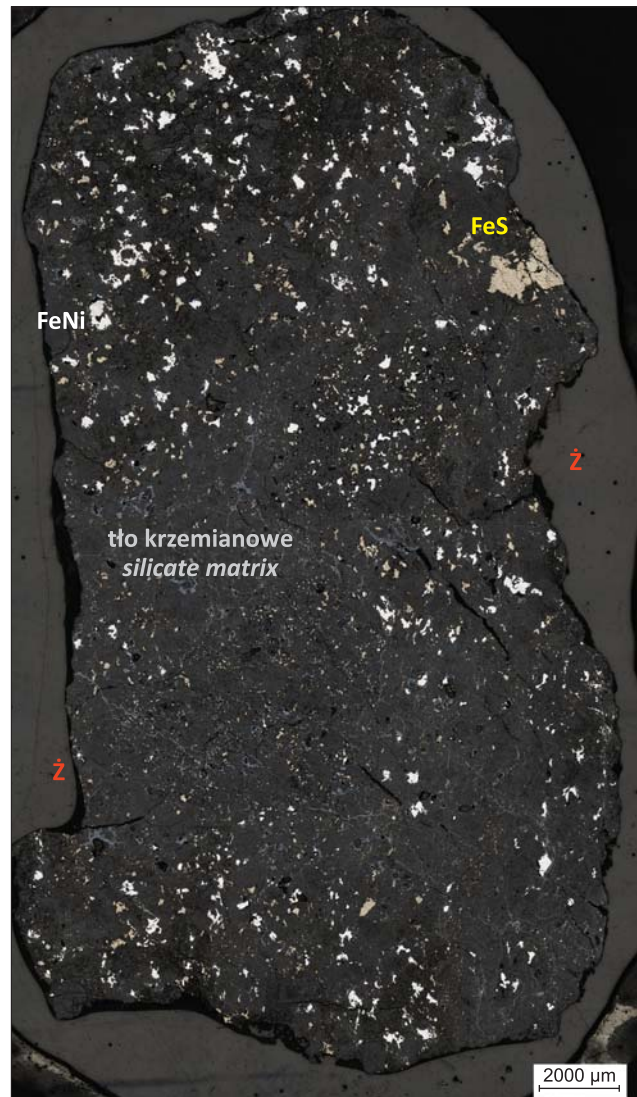
Meteoryt Tamdakht, podobnie jak Chergach, jest na Ziemi od niedawna. Jego spadek zaobserwowano 20 grudnia 2008 r. w Maroku. Fragmenty meteorytu odnaleziono na północ od miasta Warzazat na obszarze o długości ok. 25 km oraz 2 km szerokości. Tak jak poprzednie meteoryty zaliczany jest do chondrytów zwyczajnych H5, o indeksie szokowym S3 oraz stopniu zwietrzenia W0. Łączna masa znalezionych fragmentów wynosi ok. 100 kg (Weisberg i in., 2009; Ibhi, 2013, 2014; The Meteoritical Bulletin Database, 2018).

Meteoryt nazywany obecnie Gao-Guenie spadł na Ziemię 5 marca 1960 r. na terytorium Republiki Górnej Wólty (obecnie Burkina Faso). Początkowo wyróżniano dwa oddzielne meteoryty: Gao oraz Guenie, który rzekomo spadł miesiąc później, jednak ich odróżnienie jest niemożliwe i obecnie przypuszcza się, że nastąpił tylko jeden spadek. Jest to chondryt zwyczajny H5, którego stopień zwietrzenia oraz indeks szokowy nie są oficjalnie ustalone. Jego całkowita masa nie jest znana (Grossman, 1999; The Meteoritical Bulletin Database, 2018).

Ostatni z badanych meteorytów – Northwest Africa 4555 (NWA 4555) nie był obserwowany podczas spadku. Odnaleziono go w 2006 r. na pustyni w pobliżu miejscowości Erfoud w Maroku. Jest to chondryt zwyczajny H4. Jego indeks szokowy wynosi S2, zaś stopień zwietrzenia określono na W3. Masa tego chondrytu wynosi 1313 g (Connolly i in., 2007; The Meteoritical Bulletin Database, 2018).

Metody badań

Badania zostały przeprowadzone w Laboratorium Geologii i Planetologii Zakładu Geologii i Wód Mineralnych na Wydziale Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej przy użyciu mikroskopu polaryzacyjnego Nikon ECLIPSE LV100POL, podłączonej do mikroskopu kamery Nikon DS-R11 oraz programu do analizy obrazu NIS-Elements BR 4.00.00. Analizy mikroskopowe wykonano na wyciętych z meteorytu polerowanych płytkach cienkich. Tak przygotowane próbki badano pod mikroskopem polaryzacyjnym w świetle odbitym, w którym można łatwo zidentyfikować minerały FeNi (jasne, białe ziarna). Autorzy nie rozróżniali poszczególnych minerałów FeNi. Dzięki podłączonej do mikroskopu kamerze oraz przy użyciu programu NIS-Elements wykonywano zdjęcia przy 25-krotnym powiększeniu, które w czasie rzeczywistym były składane w jeden obraz próbki o wysokiej rozdzielczości. Na rysunku 1 przedstawiono uzyskany w ten sposób obraz próbki chondrytu Gao-Guenie. Do wyznaczenia zawartości objętościowej minerałów FeNi

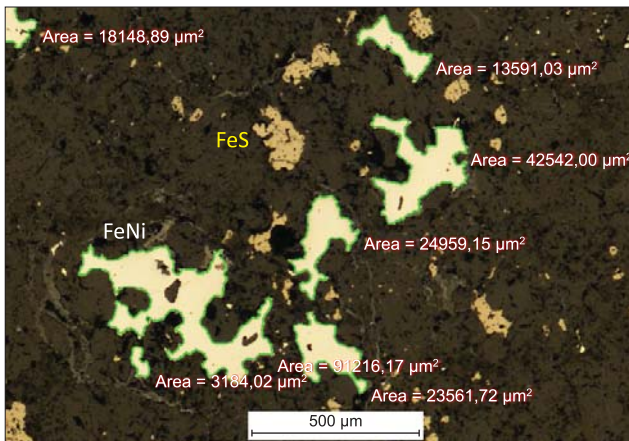


Ryc. 1. Obraz analizowanej płytki chondrytu H5 Gao-Guenie w świetle odbitym. Przedstawiona powierzchnia analizowanej płytki wynosi 335 mm². Widoczne są minerały o dużej zdolności refleksyjnej – białe, jasne ziarna FeNi oraz żółte ziarna FeS. Ż – żywica
Fig. 1. Photography of analyzed thin section of Gao-Guenie H5 chondrite in reflected light. Surface area of this thin section is 335 mm². The minerals with high reflectivity are clearly seen – white, bright FeNi grains as well as yellow FeS grains. Ż – resin

konieczne było obliczenie wielkości powierzchni badanej próbki oraz sumarycznej powierzchni minerałów FeNi w próbce, co również umożliwia program NIS-Elements. Dzięki wykonaniu zdjęcia próbki o wysokiej rozdzielczości, było możliwe odpowiednie powiększenie obrazu w programie bez utraty jego jakości. Ponieważ obraz próbki był analizowany jako całość, należało zachować konsekwencję w sposobie pomiaru, tak aby ten był jak najdokładniejszy. Obliczenie powierzchni pojedynczego minerału rozpoczynano od jego identyfikacji na podstawie barwy i zdolności refleksyjnej (jasności światła odbitego od jego powierzchni). W badanych próbkach występowały dwa rodzaje jasnych minerałów o dużej zdolności refleksyjnej: minerały FeNi oraz troilit (FeS). Duże ziarna były łatwe do rozróżnienia (minerały FeNi są wyraźnie jaśniejsze oraz mają barwę białą, zaś troilit jest żółty lub żółtawy). Mniejsze ziarna były trudniejsze do identyfikacji. Po zidentyfikowaniu zaznaczano je kursorem, a program wyznaczał kontury minerału. Po zatwierdzeniu zgodności

takiego konturu z rzeczywistym konturem ziarna mineralnego program obliczał powierzchnię zadanego ziarna mineralu. Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono fragmenty próbek meteorytów Pułtusk oraz Tamdakht wraz z wyznaczonymi przez program NIS-Elements konturami ziaren FeNi i obliczoną ich powierzchnią. Po obliczeniu powierzchni wszystkich ziaren minerałów FeNi (przeważnie powyżej 1000 ziaren na jedną płytkę cienką) obliczano ich sumaryczną powierzchnię. Przy pomiarach pomijano

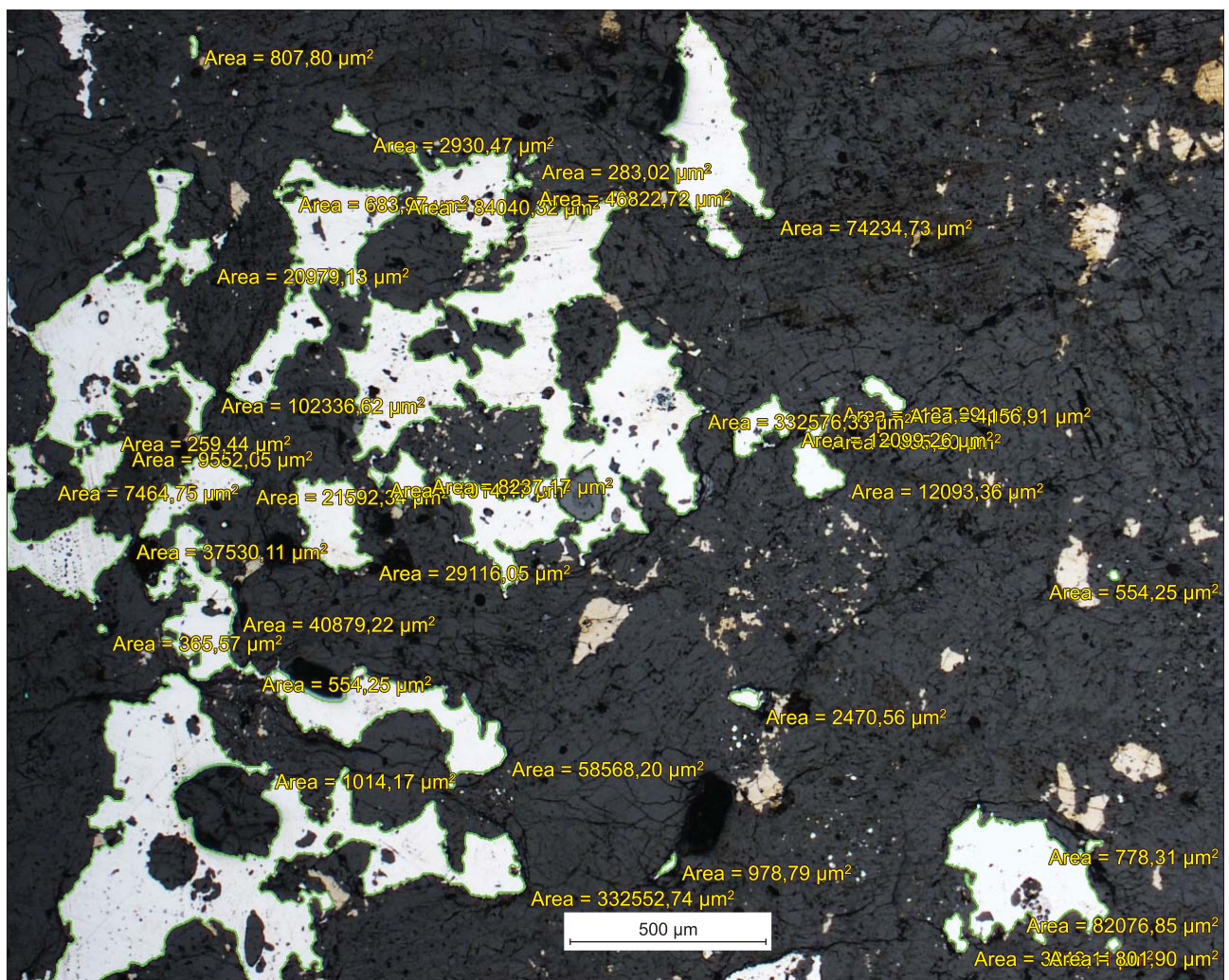
minerały o powierzchni mniejszej niż $300 \mu\text{m}^2$ z uwagi na trudność z ich jednoznaczną identyfikacją. Ostatnim pomiarem był manualny pomiar powierzchni całej próbki meteorytu, którego wyniki były eksportowane do arkusza kalkulacyjnego Excel. Następnie sumowano powierzchnię pojedynczych ziaren, uzyskując sumaryczną powierzchnię ziaren minerałów FeNi. Otrzymany wynik dzielono przez całkowitą powierzchnię próbki, co dało procentowy udział powierzchni ziaren minerałów FeNi w powierzchni całej badanej próbki chondrytu. Stosunek powierzchni ziaren minerałów FeNi do powierzchni całej próbki, przy założeniu przypadkowego, nieuporządkowanego rozkładu minerałów w meteorycie oraz braku kierunkowości, można przyjąć za objętościową zawartość ziaren FeNi w meteorycie, a jednocześnie i w jego skale macierzystej. Założenie



←

Ryc. 2. Obraz płytki chondrytu H5 Pułtusk w świetle odbitym z oznaczonymi minerałami FeNi wraz z obliczoną ich powierzchnią. Widoczne również żółte ziarna FeS w ciemnoszarym tle krzemianowym

Fig. 2. Microphotograph of Pułtusk H5 chondrite in reflected light with marked FeNi minerals whose surface area was measured. Yellow FeS grains among dark gray silicates are also seen



Ryc. 3. Obraz płytki chondrytu H5 Tamdakht w świetle odbitym z oznaczonymi minerałami FeNi wraz z obliczoną ich powierzchnią. Widoczne również żółte ziarna FeS w ciemnoszarym tle krzemianowym

Fig. 3. Microphotograph of Tamdakht H5 chondrite in reflected light with marked FeNi minerals whose surface area was measured. Yellow FeS grains among dark gray silicates are also seen

takie jest uprawnione, ponieważ autorzy na podstawie obserwacji makroskopowych i mikroskopowych badanych chondrytów nie stwierdzili obecności stref koncentracji, kierunkowości lub stref zubożonych w ziarna minerałów FeNi.

WYNIKI BADAŃ

W tabeli 1 zestawiono wyniki pomiarów powierzchni minerałów FeNi oraz całkowitej powierzchni płytek chondrytów, a także obliczeń zawartości objętościowej minerałów FeNi. Tabela 2 zawiera otrzymane wyniki pomiarów objętościowej zawartości procentowej ziaren FeNi z typem petrograficznym oraz stopniem zwietrzenia badanych meteoroidów.

Zgodnie z danymi literaturowymi zawartość objętościowa ziaren metalu (FeNi) w chondrytach H wynosi ok. 8% (Grady i in., 2014). Otrzymane przez autorów wyniki mieszczą się w zakresie 2,79–8,09%. Główną przyczyną tak dużej różnicy zawartości ziaren minerałów FeNi są procesy wietrzenia, jakim zostały poddane meteoroidy po spadku na powierzchnię Ziemi. Badane meteoroidy reprezentują trzy stopnie zwietrzenia: W0 – bez widocznych oznak wietrzenia metalu lub siarczków, W2 – widoczne jest umiarkowane wietrzenie obejmujące 20–60% ziaren FeNi, oraz W3 – 60–95% ziaren FeNi i troilitu uległo zwietrzeniu (Wlotzka, 1993; Burbine, 2017). Najcenniejszym materiałem badawczym są meteoroidy o stopniu zwietrzenia W0, które mają najbardziej zbliżony skład mineralny do pierwotnego składu skały na ciele macierzystym. Reprezentują one praktycznie niezmiennione skały swoich macierzystych planetoid. Wśród badanych meteoroidów tylko próbki chondrytów Chergach i Tamdakht nie są zwietrzałe. Zawartość ziaren FeNi w tych chondrytach wynosi odpowiednio 7,03 i 8,09%. Pozostałe próbki reprezentują meteoroidy, które są obecne na Ziemi znacznie dłużej, wskutek czego ziarna minerałów FeNi uległy wietrzeniu, zaniżając ich procentową zawartość w meteoroidzie.

Wykonane pomiary, pomimo dużej dokładności ich przeprowadzenia, są obarczone błędami związanymi ze specyfiką wykonywanych badań. Na błędy te składają się ograniczenia aparatury pomiarowej, a także dolna granica wielkości powierzchni minerałów branych pod uwagę podczas obliczeń. Dolna granica wielkości powierzchni ziaren FeNi, uwzględnianych w naszych badaniach, została wprowadzona głównie z powodu trudności jednoznacznego odróżnienia minerałów FeNi od troilitu w wybranej rozdzielczości obrazu, bez możliwości wykonania jednoczesnej analizy chemicznej w mikroobszarze.

Przy założeniu, że w każdym chondrycie H zawartość minerałów FeNi powinna wynosić ok. 8% (Grady i in. 2014), można obliczyć jaka część metalu uległa zwietrzeniu w warunkach ziemskich. Według wyników analiz autorów w przypadku meteoroidu Pułtusk wietrzeniu uległo ok. 52% minerałów FeNi (W2), zaś w Gao-Guenie oraz NWA 4555 ok. 65% (W3). Oznacza to, że w przypadku meteoroidu Pułtusk oraz NWA 4555 stopień zwietrzenia wyznaczony na podstawie obliczeń jest zgodny z danymi literaturowymi. W przypadku meteoroidu Gao-Guenie nie ma oficjalnie podanego stopnia zwietrzenia. Jakubowska i in. (2017) określili stopień wietrzenia chondrytu Gao-Guenie jako W2. Przeprowadzone przez autorów badania sugerują natomiast, że badany przez nich okaz chondrytu zwyczajnego Gao-Guenie charakteryzował się stopniem wietrzenia W3. Może to świadczyć o niejednorodności meteoroidu Gao-

-Guenie lub też, co bardziej prawdopodobne, inny stopień wietrzenia wynika z różnych warunków przechowywania próbek badanych przez Jakubowską i in. (2017) oraz autorów tego artykułu.

W kontekście analizy zasobności pozaziemskich skał rudonośnych znaczenie mają przede wszystkim wyniki otrzymane dla meteoroidów Chergach i Tamdakht. Jako jedyne spośród badanych nie są one zwietrzałe, czyli stanowią wiarygodne źródło informacji o zasobności swoich ciał macierzystych. W przypadku pozostałych próbek możliwość określenia pierwotnej zawartości ziaren minerałów FeNi z odpowiednią dokładnością jest mocno ograniczona, jednak można oczekiwać, że wartości te były zbliżone do wartości średniej dla grupy H. Ponadto analizie poddaje się jedynie zawartość minerałów FeNi. Oznacza to, że nieznaną jest dokładna zawartość żelaza, gdyż nie wyznaczono w badanych próbkach zawartości objętościowej kamacytu, taenitu i tetrataenitu, ani też troilitu (FeS), czy krzemianów, w skład których także wchodzi żelazo. Wiadomo jednak, że w chondrytach H zawartość objętościowa troilitu wynosi ok. 7% (Grady i in., 2014). Niemniej jednak jako minerały rudne żelaza i niklu mogą być traktowane tylko minerały FeNi, tj. kamacyt oraz podrzędnie taenit i tetrataenit. Troilit, jako siarczek żelaza ze względów technologicznych nie jest traktowany jako minerał rudny Fe. Podobnie żelazo zawarte w strukturze krzemianów (głównie oliwinów i piroksenów) także nie jest rozważane jako potencjalne zasoby tego metalu, które nadają się do eksploatacji.

Wykonane badania są potwierdzeniem danych literaturowych odnośnie zawartości objętościowej FeNi w chondrytach grupy H. Przyjmując zawartość FeNi za równą 8% (Grady i in., 2014), można w przybliżeniu określić zasoby rudy FeNi planetoidy 6 Hebe uważanej za ciało macierzyste chondrytów H. Objętość 6 Hebe wyznaczona na podstawie jej gęstości oraz masy (Baer i in., 2011) wynosi ok. $3\,365\,000\text{ km}^3$, co oznacza, że 8% minerałów FeNi w tej planetoidzie stanowi objętość $269\,200\text{ km}^3$. Dominującym minerałem FeNi jest kamacyt, którego gęstość wynosi $7,85\text{ g/cm}^3$. Natomiast gęstość towarzyszącego mu taenitu jest zmienna w przedziale $7,8\text{--}8,2\text{ g/cm}^3$, a gęstość podrzędnie występującego tetrataenitu wynosi $8,275\text{ g/cm}^3$ (Maneck, 2004). Do przeprowadzenia obliczeń przyjęto dla ziaren FeNi (dominującego kamacytu, podrzędnie występującego taenitu i ewentualnie obecnego w niewielkiej ilości tetrataenitu łącznie) gęstość $7,9\text{ g/cm}^3$. Założono także, że ziarna wszystkich minerałów FeNi zawierają średnio 90% wag. Fe i 10% wag. Ni z uwagi na dominującą ilość ziaren kamacytu. Przy takich założeniach obliczono, że zasoby stopu FeNi na asteroidzie 6 Hebe wynoszą $2,127 \cdot 10^{16}\text{ Mg}$, na które składa się ok. $1,914 \cdot 10^{16}\text{ Mg}$ żelaza oraz ok. $0,213 \cdot 10^{16}\text{ Mg}$ niklu. Aktualna górnicza produkcja żelaza na Ziemi wynosi $1,5 \cdot 10^{10}\text{ Mg}$, natomiast niklu $2,1 \cdot 10^7\text{ Mg}$ (U.S. Geological Survey, 2018). Oznacza to, że zasobów rudy FeNi znajdującej się na planetoidzie 6 Hebe wystarczyłoby na około 1,28 mln lat w przypadku konieczności zaspokojenia popytu na żelazo oraz na ponad 100 mln lat w przypadku konieczności zaspokojenia popytu na nikiel, przy założeniu obecnego zapotrzebowania na te metale. Dla znacznie mniejszych asteroidów mogących być ciałami macierzystymi chondrytów zwyczajnych grupy H, jak np. dla 9969 Braille, której objętość oszacowana na podstawie jej rozmiarów (Oberst i in., 2001) wynosi ok. $2,1\text{ km}^3$, zasoby żelaza i niklu wyznaczone tą samą metodą są równe współczesnej produkcji żelaza

przez 10 miesięcy oraz niklu przez 63 lata. W przypadku Obiektów Bliskich Ziemi (NEO), za przykład ciała macierzystych chondrytów H może posłużyć asteroida (143624) 2003 HM₁₆, której średnica wynosi ok. 2,1 km (NASA, 2018). Przy założeniu, że kształt tej asteroidy jest zbliżony do kuli, a jej skład odpowiada chondrytom zwyczajnym H, żelazo oraz nikiel zawarte w minerałach FeNi zaspokoiliby zapotrzebowanie na te surowce przez 15 miesięcy w przypadku żelaza oraz przez ponad 100 lat w przypadku niklu.

W perspektywie wciąż dość odległej przyszłości ciała macierzyste badanych chondrytów zwyczajnych grupy H mogą stać się cennym źródłem żelaza, niklu oraz innych metali (przede wszystkim kobaltu i miedzi). Jak wynika z dotychczasowych badań autorów (Łuszczek, Przylibski, 2011, 2013; Łuszczek, 2012, 2017; Przylibski, Łuszczek, 2012), wysoka zawartość metali w rudzie jest podobna w całej objętości planetoidy, co czyni takie pojedyncze ciało w całości złożem. Dodatkowo w początkowej fazie eksploatacji będzie możliwe wydobycie luźnego regolitu pokrywającego powierzchnię asteroid (Tsuchiyama i in., 2011; Michel, 2014; Łuszczek, 2012, 2017; Łuszczek, Przylibski, 2013; Przylibski, Łuszczek, 2012; Przylibski, 2015). Spowoduje to znaczące zmniejszenie kosztów początkowych inwestycji. Obecnie nie ma żadnych wytycznych dotyczących wyznaczenia granicy bilansowości złóż pozaziemskich. Próby określenia bilansowości na podstawie założeń dla złóż ziemskich i wartości tych zasobów, chociaż działają pobudzająco na wyobraźnię, są bezcelowe. Aktualnie brakuje możliwości technicznych i ekonomicznych do rozpoczęcia działalności górniczej poza Ziemią. Biorąc pod uwagę tempo rozwoju technologicznego, problemy natury technicznej zostaną zapewne rozwiązane w przeciągu najbliższych lat, jednak ekonomia jeszcze długo będzie wstrzymywała człowieka przed sięgnięciem po surowce Układu Słonecznego zgromadzone poza Ziemią. Zasoby te należy traktować jako zabezpieczenie w razie wyczerpania się złóż ziemskich, a także jako przyszłe źródło surowców, które będą niezbędne, jeżeli człowiek zapragnie eksplorować Układ Słoneczny.

WNIOSKI

Procentowa zawartość objętościowa minerałów FeNi w próbkach badanych chondrytów H – Chergach i Tamdakht o stopniu zwiertzenia W0 jest zbliżona do wartości podanej w literaturze (7,03% oraz 8,09% wobec 8% wg Grady i in. (2014)). Oznacza to, że otrzymane przez autorów wyniki badań zawartości minerałów FeNi w skałach macierzystych chondrytów H są wiarygodne i mogły posłużyć dalszej analizie. Wskazują one również, że badanie zawartości minerałów FeNi w chondrytach stosunkowo prostą i taną metodą mikroskopii optycznej w świetle odbitym sprzężonej z komputerową analizą obrazu jest miarodajne. Zawartości minerałów FeNi w próbkach pozostałych badanych chondrytów H, o większym stopniu zwiertzenia, były znacznie mniejsze od wartości średniej dla grupy H. Daje to zafałszowany obraz zawartości badanych metali w skałach ciał macierzystych tych chondrytów.

Przeprowadzone obliczenia wykazały, że przy zachowaniu obecnego poziomu wydobycia żelaza na Ziemi zasoby Fe znajdujące się na planetoidzie 6 Hebe, wskazywanej jako ciało macierzyste chondrytów zwyczajnych grupy H, wystarczyłyby na pokrycie ziemskiego zapotrzebowania na ten metal przez ok. 1,3 mln lat, a w przypadku zapotrzebo-

wania na nikiel przez ok. 100 mln lat. Jeśli chodzi o znacznie mniejsze asteroidy, które także mogą być ciałami macierzystymi chondrytów H, np. 9969 Braille, jest to odpowiednio 10 miesięcy dla żelaza oraz 63 lata dla niklu. Reprezentująca NEO asteroida (143624) 2003 HM₁₆ jest w stanie zaspokoić zapotrzebowanie na żelazo przez 15 miesięcy oraz na nikiel przez ponad 100 lat.

Ciągły rozwój cywilizacji jest uzależniony od dostępu do surowców, a nie ma wątpliwości co do tego, że wszystkie ich zasoby występują na Ziemi w ograniczonych ilościach. W ciągu najbliższych stu lat raczej nie grozi nam brak żelaza. Również aktualnie znane złoża niklu, łącznie z perspektywnymi zasobami zgromadzonymi na dnie oceanów, nie powodują obaw o ewentualny niedobór tego metalu na Ziemi. Długo więc nie będzie potrzeby pozyskiwania tych dwóch metali spoza naszej planety. Trudno jednak sobie wyobrazić, by ewentualna ekspansja cywilizacji człowieka poza Ziemię opierała się na ziemskich surowcach. Przeprowadzone przez autorów badania, a także obliczenia wskazują, że w stosunkowo niedużej odległości od Ziemi znajduje się wystarczająco dużo żelaza oraz niklu w postaci minerałów rudnych tworzących złoża nadające się do eksploatacji, by ludzkie kolonie w wewnętrznej części Układu Słonecznego mogły w pełni uniezależnić się od kosztownego „importu” tych metali z naszej planety.

Badanie meteorytów, które spadły na Ziemię jest obecnie najtańszym i najefektywniejszym sposobem określania zasobów geologicznych (rozumianych jako całość kopaliny w złożu) surowców poza Ziemią. Z uwagi na to, że najliczniejszą grupę odnajdywanych meteorytów stanowią chondryty zwyczajne, najwięcej dostępnych informacji jest właśnie odnośnie tej grupy meteorytów i ich ciał macierzystych. Chondryty H, badane w ramach tej pracy, pochodzą prawdopodobnie ze wspólnego ciała macierzystego, którym jest planetoida 6 Hebe. Ich źródłem mogą być także niektóre mniejsze asteroidy pasa głównego oraz ok. 10% NEO.

Dalsze badania meteorytów, zwłaszcza chondrytów o stopniu zwiertzenia W0, oprócz pogłębiania wiedzy odnośnie zawartości cennych gospodarczo pierwiastków, czy minerałów, powinny się również skupiać na badaniu możliwości przeróbki skał pochodzących z ciał pozaziemskich w miejscu ich wydobycia. Powinny one także uwzględniać warunki panujące w przestrzeni kosmicznej, na przykład ograniczony dostęp do wody, małą grawitację, czy niskie ciśnienie lub próżnię. Odseparowanie materiału użytecznego od skały płonnej na miejscu eksploatacji zmniejsza koszty, a także daje możliwość większego jednorazowego transportu surowca. Jest to istotne, jeżeli w przyszłości surowce pozaziemskie miałyby zastąpić wyczerpujące się zasoby naszej planety, czy też zostać wykorzystane na innych ciałach Układu Słonecznego.

Niniejszy artykuł powstał w dużej części na podstawie pracy magisterskiej Konrada Blutstein, napisanej pod opieką naukową Tadeusza A. Przylibskiego na Wydziale Geoinżynierii, Górniczo i Geologii Politechniki Wrocławskiej. Realizację części badań, których wyniki prezentujemy, umożliwiły publiczne środki finansowe przyznane autorom w ramach realizacji projektów nr 0401/0125/17 i 0402/0038/18 realizowanych w Zakładzie Geologii i Wód Mineralnych Wydz. Geoinżynierii, Górniczo i Geologii PWr. Autorzy przeprowadzili część badań, wykorzystując również środki przyznane na badania statutowe Wydz. Geoinżynierii, Górniczo i Geologii PWr. w roku 2018. Składamy również podziękowania za bardzo życzliwe oraz wnikliwie i konstruktywne recenzje artykułu prof. Andrzejowi Muszyńskiemu i dr. Krzysztofowi Szopie.

LITERATURA

- BAER J., CHESLEY S., MATSON R. 2011 – Astrometric masses of 26 asteroids and observations on asteroid porosity. *W. Astronomic. J.*, 141 (5): 1–12.
- BADESCU V. (red.) 2013 – Asteroids. Prospective Energy and Material Resources. Springer.
- BEATTY J.K., COLLINS PETERSEN C., CHAIKIN A. 1999 – The New Solar System. Cambridge University Press, New York, USA.
- BLAIR B.R. 2000 – The Role of Near-Earth Asteroids in Long-Term Platinum Supply. Second Space Resources Roundtable, Colorado School of Mines, 8–10.11.2000 Boulder, CO, USA (<http://www.nss.org/settlement-asteroids/RoleOfNearEarthAsteroidsInLongTermPlatinumSupply.pdf>).
- BURBINE T. 2017 – Asteroids. Astronomical and Geological Bodies. Cambridge University Press, Cambridge.
- BUS S.J., BINZEL R.P. 2002 – Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. A Feature-Based Taxonomy. *Icarus*, 158: 146–177.
- CLARK B.E., HAPKE B., PIETERS C., BRITT D. 2002 – Asteroid Space Weathering and Regolith Evolution. [W:] Bottke W.F. Jr., Cellino A., Paolicchi P., Binzel R.P. Asteroids III, University of Arizona Press, Tucson: 585–599.
- CLARKE R.S., SCOTT E.R.D. 1980 – Tetrataenite – ordered FeNi, a new mineral in meteorites. *Am. Miner.*, 65: 624–630.
- CONNOLLY H.C., SMITH C., BENEDIX G., FOLCO L., RIGHTER K., ZIPFEL J., YAMAGUCHI A., CHENNAOUI AOUJJEHANE H. 2007 – The Meteoritical Bulletin, No. 92. *Meteorit. Planet. Sci.*, 42 (9): 1647–1694.
- DUNN T.L., BURBINE T.H., BOTTKE W.F. JR, CLARK J.P. 2013 – Mineralogies and source regions of Near-Earth asteroids. *Icarus*, 222: 273–282.
- GAFFEY M., GILBERT S. 1998 – Asteroid 6 Hebe: The probable parent body of the H-Type ordinary chondrites and the IIE iron meteorites. *Meteorit. Planet. Sci.*, 3: 1281–1295.
- GERTSCH R., GERTSCH L.S., REMO J.L. 1997 – Mining Near-Earth Resources. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 822: 511–537.
- GRADY M.M., PRATESI G., MOGGI CECCHI V. 2014 – Atlas of meteorites. Cambridge University Press, Cambridge.
- GROSSMAN J. 1999 – The Meteoritical Bulletin, No. 83. *Meteorit. Planet. Sci.*, 34: A169–A186.
- GURDZIEL A., KARWOWSKI Ł. 2009 – Wietrzenie meteorytów na przykładzie Moraska i Pułuska. *Acta Soc. Metheorit. Pol.*, 1: 28–34.
- HSU J. 2009 – New Rocket Fuel Mixes Ice and Metal. <http://space.com> (5.05.2010).
- IBHI A. 2013 – Meteors and meteorite falls in Morocco. *Int. Lett. Chem. Phys. Astron.*, 12: 28–35.
- IBHI A. 2014 – Morocco meteorite falls and finds: some statistics. *Int. Lett. Chem. Phys. Astron.*, 1: 18–24.
- JAKUBOWSKA M., RZEPECKA P., DUDA P., WOŹNIAK M., GAŁĄZKA-FRIEDMAN J. 2017 – Badania mössbauerowskie chondrytów zwyczajnych typu H potwierdzają stopień ich zwietrzenia określony za pomocą skały. *W. Acta Soc. Metheorit. Pol.*, 8: 63–72.
- KAMIŃSKA E., KOSIŃSKI J.W. 2009 – Upadek i rozmieszczenie fragmentów meteorytu Pułusk. *Meteorit. Planet. Sci.*, 44 (69): 6–9.
- KARGEL J.S. 1994 – Metalliferous asteroids as potential sources of precious metals. *J. Geophys. Res.*, 99: 2114–2129.
- KOSIŃSKI J.W. 2007–2008 – Biblioteczka meteorytu Pułusk – zeszyty. Wyszków.
- KRZESIŃSKA A. 2013 – Deformacja i metamorfizm meteorytu pułuskiego. Praca doktorska. ING PAN, Wrocław.
- KRZESIŃSKA A. 2016 – Thermal metamorphic evolution of the Pułusk 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 Pułusk H chondrite. *Meteorit. Planet. Sci.*, 52 (11): 2305–2321.
- KRZESIŃSKA A. 2018 – Klast stopu impaktowego w brekcji pułuskiej. *Acta Soc. Metheorit. Pol.*, 9: 74–91.
- KRZESIŃSKA A., FRITZ J. 2014 – Weakly shocked and deformed CM microxenoliths in the Pułusk 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 Pułusk H chondrite inferred from petrofabric analysis. *Meteorit. Planet. Sci.*, 50 (3): 401–417.
- LANG K.R. 2011 – The Cambridge Guide to the Solar System. Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- LEWIS J.S. 1997 – Mining the sky: Untold Riches from the Asteroids, Comets, and Planets. Addison-Wesley Publishing Company.
- LEWIS J.S., MATTHEWS M.S., GUERRIERI M.L. 1993 – Resources of Near Earth Space. University of Arizona Press.
- ŁUSZCZEK K. 2011 – Poszukiwania nowych zasobów surowców w Układzie Słonecznym. *Pr. Nauk. Inst. Gór. PWroc., Studia i Materiały*, 40: 85–94.
- ŁUSZCZEK K. 2012 – Chemical composition of L chondrites group and potential natural resources of their parent bodies. [W:] Drzymała J., Cieżkowski W. (red.), *Interdyscyplinarne zagadnienia w górnictwie i geologii*, tom 3, Wrocław: 161–173.
- ŁUSZCZEK K. 2017 – Potencjalne złoża surowców metalicznych i ich zasoby na ciałach macierzystych chondrytów zwyczajnych. Praca doktorska. Wydz. Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii PWroc.
- ŁUSZCZEK K. 2018 – Potential importance of metallic resources of ordinary chondrite parent bodies. *Min. Sci.*, 25: 71–83.
- ŁUSZCZEK K., PRZYLIBSKI T.A. 2013 – Skład chondrytów zwyczajnych a potencjalne surowce pasa planetoid. *Acta Soc. Metheorit. Pol.*, 2: 92–111.
- ŁUSZCZEK K., PRZYLIBSKI T.A. 2013 – Resources of selected metals in parent bodies of ordinary chondrites. *Meteorit. Planet. Sci.*, 48, supplement #5075.
- ŁUSZCZEK K., PRZYLIBSKI T.A. 2014 – Resources of selected metals in chondrites' parent bodies. *Meteorit. Planet. Sci.*, 49, supplement #5225.
- ŁUSZCZEK K., PRZYLIBSKI T.A. 2015 – Chemical composition of meteorites as representative material for potential metallic resources of their parent bodies. *Meteorit. Planet. Sci.*, 50, supplement #5383.
- MANECKI A. 1972 – Studium mineralogiczno-petrograficzne meteorytu Pułusk. *Pr. Mineral. PAN*, 27: 53–65.
- MANECKI A. 2004 – Encyklopedia minerałów z polskim i angielskim słownikiem nazw. Wyd. AGH, Kraków.
- MCKAY M.F., MCKAY D.S., DUKE M.B. 1992 – Space resources. U.S. Government Printing Office, Washington.
- THE METEORITICAL BULLETIN DATABASE, The Meteoritical Society, International Society for Meteoritics and Planetary Science (<https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php>; dostęp 06.10.2018).
- MICHEL P. 2014 – Formation and Physical Properties of Asteroids. *Elements*, 10: 19–24.
- MOSKOWITZ C. 2010 – 'Wet' Asteroid Could Be a Space Gas Station. <http://space.com> (10.05.2010).
- NASA, 2018. JPL Small-Body Database Browser (<https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi#top>, dostęp: 10.10.2018)
- NEDELUCU D.A., BIRLAN M., POPESCU M., BADESCU O., PRICOPI D. 2014 – Evidence for a source of H chondrites in the outer main asteroid belt. *Astron. Astrophys.*, 567 (L7): 1–5.
- OBERT J., MOTTOLA S., DI MARTINO M., HIKCS M., BURATTI B., SODERBLOM L., THOMAS N. 2001 – A model for Rotation and Shape of Asteroid 9969 Braille from Ground-Based Observations and Images Obtained during the Deep Space 1 (DS1) Flyby. *Icarus*, 153: 16–23.
- PILSKI A.S. 1992 – Pułuski deszcz meteorytów. *Meteorit. Planet. Sci.*, 4: 11–14.
- PRADO M. 2009 – Permanent. Chapter 1.6. Mining and Processing an Asteroid (www.permanent.com/a-mining.htm).
- PRZYLIBSKI T.A. 2015 – Górnictwo pozaziemskie. *Meteorit. Planet. Sci.*, 50 (95): 3–10.
- PRZYLIBSKI T.A., ŁUSZCZEK K. 2012 – Mineral resources of extra-terrestrial bodies of the Solar System. *Mineralogia, Spec. Pap.*, 40: 51–52.
- PRZYLIBSKI T.A., ŁUSZCZEK K. 2018 – Wyniki badań mineralogicznych i petrologicznych nowych okazów meteorytu Pułusk w 150 rocznicę spadku. *Prz. Geol.*, 66 (6): 368–378.
- PRZYLIBSKI T.A., DONHEFNER H., ŁUSZCZEK K. 2012 – Ciała macierzyste meteorytów żelaznych jako złoża metali. *Acta Soc. Metheorit. Pol.*, 3: 71–103.
- RUBIN A.E. 1990 – Kamacite and olivine in ordinary chondrites: Inter-group and intragroup relationships. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 54: 1217–1232.
- SIEMIĄTKOWSKI J. 2004 – Chondryt Pułusk: przykład meteorytowej brekcji wielokładnikowej (H4 + H5). *Meteorit. Planet. Sci.*, 39 (50): 26–28.
- SONTER M.J. 1998 – The technical and economic feasibility of mining the Near-Earth Asteroids. 49 IAF Congress, 28.09–2.10.1998 Melbourne, Australia.
- SONTER M.J. 2006 – Asteroid Mining: Key to Space Economy. <http://space.com> (10.05.2010).
- SULLIVAN R.J., THOMAS P.C., MURCHIE S.L., ROBINSON N.S. 2002 – Asteroid Geology from Galileo and NEAR Shoemaker Data. [W:] Bottke W.F. Jr., Cellino A., Paolicchi P., Binzel R.P. (red.), Asteroids III, University of Arizona Press. Tucson: 331–350.
- TSUCHIYAMA A. 2014 – Asteroid Itokawa – A source of ordinary chondrites and a laboratory for surface processes. *Elements*, 10: 45–50.
- TSUCHIYAMA A., UESUGI M., MATSUSHIMA T., MICHIKAMI T., KADONO T., NAKAMURA T., UESUGI K., NAKANO T., SANDFORD S.A., NOGUCHI R., MATSUMOTO T., MATSUNO J., NAGANO T., IMAI Y., TAKEUCHI A., SUZUKI Y., OGAMI T., KATAGIRI J., EBHARA M., IRELAND T.R., KITAJIMA F., NAGAO K., NARAOKA H., NOGUCHI T., OKAZAKI R., YURIMOTO H., ZOLENSKY M.E., MUKAI T., ABE M., YADA T., FUJIMURA A.,

- YOSHIKAWA M., KAWAGUCHI J. 2011 – Three-dimensional structure of Hayabusa samples: origin and evolution of Itokawa regolith. *Sci.*, 333: 1125–1128.
- TSUCHIYAMA A., UESUGI M., UESUGI K., NAKANO T., NOGUCHI R., MATSUMOTO T., MATSUNO J., NAGANO T., IMAI Y., SHIMADA A., TAKEUCHI A., SUZUKI Y., NAKAMURA T., NOGUCHI T., ABE M., YADA T., FUJIMURA A. 2014 – Three-dimensional microstructures of samples recovered from asteroid 25143 Itokawa: Comparison with LL5 and LL6 chondrite particles. *Meteorit. Planet. Sci.*, 49: 172–187.
- U.S. Geological Survey, 2018. Mineral Commodity Summaries 2018. USGS, Virginia.
- VERNAZZA P., ZANDA B., BINZEL R.P., HIROI T., DEMEO F.E., BIRLAN M., HEWINS R., RICCI L., BARGE P., LOCKHART M. 2014 – Multiple and fast: the accretion of ordinary chondrite parent bodies. *Astrophys. J.*, 791 (120).
- WEISBERG M., SMITH C., BENEDIX G., FOLCO L., RIGHTER K., ZIPFEL J., YAMAGUCHI A., CHENNAOUI A OUDJEHANE H. 2008 – The Meteoritical Bulletin, No. 94. *Meteorit. Planet. Sci.*, 43 (9): 155–1588.
- WEISBERG M., SMITH C., BENEDIX G., FOLCO L., RIGHTER K., ZIPFEL J., YAMAGUCHI A., CHENNAOUI A OUDJEHANE H. 2009 – The Meteoritical Bulletin, No. 95. *Meteorit. Planet. Sci.*, 44 (3): 1–33.
- WLOTZKA F. 1993 – A weathering scale for the ordinary chondrites. *Meteoritics*, 28: 460.
- ZUBRIN R., WAGNER R. 1997 – Czas Marsa. Prószyński i Spółka, Warszawa.

Praca wpłynęła do redakcji 16.10.2018 r.
Akceptowano do druku 16.11.2018 r.