

Katarzyna ŁUSZCZEK¹, Tadeusz A. PRZYLIBSKI¹

Skład chondrytów zwyczajnych a potencjalne surowce pasa planetoid

Composition of Ordinary Chondrites and Potential Natural Resources of Asteroid Belt

Abstract: In this article the authors present a simple method of determining the content of selected metal raw materials (Fe, Ni, Co) on the parent bodies of ordinary chondrites. Thanks to the use of planimeter for measuring, under microscope, polished slices of meteorites, it is possible to estimate quite accurately the proportion of these metals in the parent bodies of meteorites, i.e. on asteroids. When it comes to analysing a large number of polished slices, these results will be most likely comparable to much more expensive results of chemical tests conducted on meteorites. Based on the analysis of 16 thin polished sections and polished slices of 11 ordinary chondrites, the authors found out that the highest content of Fe, Ni and Co ore minerals, reaching 10,06% of the total volume, can be found in ordinary chondrites from group H. For ordinary chondrites from groups L and LL, it makes 3,86% and 3,93% of the volume respectively.

Employing the results of chemical analyses available in literature sources, the authors also estimated the size of Fe, Ni and Co resources for several selected asteroids. These bodies contain higher concentrations of iron, nickel and cobalt than terrestrial deposits (those found in the earth's crust). The total content of Fe on parent bodies of even the most deficient in metals group LL of ordinary chondrites is about twice as high as that in the earth's crust. Cobalt occurs on parent asteroids of ordinary chondrites in concentrations 15–24 times as high as those in the earth's crust, and the concentrations of Ni are 100–180 times as high as those in the earth's crust. The contents of these metals on parent asteroids of ordinary chondrites are also several times as high as those in currently extracted deposits in the earth's crust.

Taking into account the mean annual terrestrial production of these metals, the authors have estimated that a parent asteroid of ordinary chondrites with the size between 433 Eros and 6 Hebe could satisfy our need for Fe, Ni and Co for the nearest several million to dozens of billion years. Considering the fact that asteroid belt contains plenty of such objects, and as many asteroids built chiefly of Fe-Ni alloy, one should regard this section of the Solar System as a practically inexhaustible source of metal raw materials. The prospect of their exploitation is probably much nearer than we can currently imagine.

Keywords: chondrite, ordinary chondrite, meteorite, asteroid, asteroid belt, Fe-Ni alloy, troilite, natural resource, extraterrestrial resource

¹ *Politechnika Wroclawska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Instytut Górnictwa, Zakład Geologii i Wód Mineralnych; Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27, 50-370 WROCŁAW, Katarzyna.Luszczek@pwr.wroc.pl*

Wstęp

Wraz z rozwojem cywilizacji wzrasta zapotrzebowanie na surowce mineralne. Wymusza to eksploatację złóż, których wcześniej nie wykorzystywano ze względu na trudne warunki eksploatacji i/lub przeróbki surowca. Jednak pomimo automatyzacji górnictwa oraz nowych technik przeróbki kopalin, umożliwiających odzyskiwanie metali i innych surowców nawet z niskoprocentowych złóż, uświadamiamy sobie coraz dobitniej, że zasoby większości pożądaných i niezastąpionych jak dotąd surowców są ograniczone. Ograniczone, jeśli spojrzeć na nie z perspektywy Ziemi. W Układzie Słonecznym wciąż drzemią bowiem liczne pokłady złóż czekających na odkrycie, udokumentowanie i wykorzystanie. Wizja eksploatacji surowców pozaziemskich przestaje być już tylko wyimaginowaną przygodą z filmów science fiction – staje się koniecznością. Ze względu na ogromne odległości w Układzie Słonecznym, rozsądne wydaje się poszukiwanie i rozpoznanie w pierwszej kolejności złóż znajdujących się w sąsiedztwie naszej planety. Potencjalnym źródłem surowców są więc Księżyc, Mars, księżycy Marsa, Jowisza i Saturna oraz obiekty znajdujące się w pasie planetoid. Szczególnie atrakcyjny, ze względu na dostępność oraz mnogość surowców, jest niewątpliwie pas planetoid. Może on stać się zapleczem surowcowym zarówno dla Ziemi, jak i dla osiedli ludzkich poza Ziemią, z których pierwsze, jak można sądzić obecnie, mogą powstać na Marsie. Informacje o składzie mineralnym znajdujących się w pasie planetoid ciał niebieskich, pochodzą ze szczegółowych badań meteorytów docierających do powierzchni Ziemi z tego obszaru. Ważną rolę odgrywają tu chondryty, zwłaszcza chondryty zwyczajne, będące najliczniejszymi meteorytami spotykanymi na Ziemi. Ostatnio także planetoidy badane są bezpośrednio, jak np. asteroida 433 Eros (Faure, 2004), a nawet przywożone są z nich na Ziemię próbki do badań – 25 143 Itokawa, misja Sokół (Moskowitz, 2010). W pobliżu planetoid: 951 Gaspra, 243 Ida, 253 Mathilda, 9969 Braille, 2685 Masursky, 5535 Annefrank przeleciały sondy wykonując serie zdjęć, które dostarczyły informacji o charakterze i składzie powierzchni małych ciał Układu Słonecznego (Sears, 2004).

Największą jednak masę materii pozaziemskiej na naszej planecie stanowią jak dotąd meteoryty, a wśród nich chondryty zwyczajne. Dla kolekcjonerów meteorytów te tak już spowszedniały, że określenie ich jako zwyczajnych nabrało nowego, niekiedy może nawet pejoratywnego, znaczenia. Należy pamiętać jednak o tym, że wciąż stanowią one istotny fragment niemal pierwotnej materii, z której ukształtował się Układ Słoneczny. Wciąż wielu uczonych próbuje wyjaśnić w pełni ich genezę, aby zrozumieć procesy zachodzące w młodym Układzie Słonecznym, które zadecydowały o jego współczesnym obliczu. Według autorów wciąż jeszcze nowym wyzwaniem pozostaje inna informacja, jaką niosą ze sobą chondryty zwyczajne, a jej pełnym wykorzystaniem zajmuje się nadal niewiele osób. Chondryty zwyczajne przechowują mianowicie w swoim składzie i budowie informacje o potencjalnych zasobach wielu surowców, występujących na ich ciałach macierzystych w pasie planetoid.

Rozpoznanie budowy i zasobności złóż surowców na ciałach macierzystych chondrytów zwyczajnych można i należy rozpocząć na Ziemi. Badania takie powinno się zacząć od analizy informacji o tych złożach, jakie zapisane są w budowie (teksturze) oraz składzie mineralnym i chemicznym meteorytów.

Chondryty i pas planetoid jako obiekty badań

Chondryty zwyczajne należą do meteorytów kamiennych i są najliczniejszymi meteorytami spotykanymi w kolekcjach ziemskich. Ich powstanie związane jest z początkiem Układu Słonecznego, kiedy to w bezpośrednim sąsiedztwie tworzącego się Słońca materia była na tyle gorąca, by krzemiany mogły ulec odparowaniu na dystans około 3 j.a. – do strefy planet wewnętrznych i pasa planetoid. W strefie tej schłodzony gaz ulegał zagęszczeniu w kilku etapach, wzbogacając powstające zalążki planet w produkty kondensacji. Za pierwotną grupę meteorytów, z której następnie rozwinęły się inne grupy chondrytów uważa się grupę CI. W skale macierzystej chondrytów CI obecne są wszystkie pierwiastki chemiczne mgławicy słonecznej, które skondensowały do tego momentu, tzn. pierwiastki trudnotopliwe, pierwiastki główne, kondensujące jako krzemiany magnezu i żelaza oraz pierwiastki lotne i bardzo lotne (Hutchison, 2004).

Chondryty nie stanowią jednorodnej grupy meteorytów, lecz różnią się między sobą składem chemicznym, mineralnym i budową wewnętrzną – teksturą. Chondryty zwyczajne zajmują miejsce pomiędzy dwiema skrajnie różnymi klasami – klasą chondrytów węglistych (charakteryzujących się wysokim stosunkiem Mg/Si i wysokim stopniem utlenienia; wiele z nich jest uwodnionych oraz zawiera znaczną ilość żelaza Fe^{3+} , występującego w magnetycie) oraz chondrytów enstatytowych (mają niski stosunek Mg/Si, są mocno zredukowane, zawierają głównie krzemiany pozbawione żelaza oraz pierwiastki takie jak Ca, Mn, Mg i K, które normalnie wchodziły w skład krzemianów, w nich natomiast są obecne w siarczках). Chondryty zwyczajne mają więc średni stosunek Mg/Si i zawierają znaczne ilości zarówno żelaza w formie metalicznej, jak i utlenionego. Ilość oraz różnice w zawartości żelaza na poszczególnych stopniach utlenienia są przyczyną podziału chondrytów zwyczajnych na trzy grupy (H – zawierającą dużo żelaza metalicznego, L – zawierającą mało żelaza metalicznego i LL – zawierającą mało żelaza metalicznego oraz mało metali) (Hutchison, 2004).

W przeciwieństwie do grup chemicznych chondrytów, typy petrograficzne utworzyły się później, już po powstaniu ich ciał macierzystych i są dowodem dalszych przemian, które nastąpiły podczas ogrzewania tych ciał. Chondryty zwyczajne występują w typach 3–6. Znanych jest tylko kilka chondrytów z grup H i L w typie 7. Ten wysoki poziom termalnego metamorfizmu jest lepiej reprezentowany przez grupę LL (Hurnik i Hurnik, 2005).

Za źródło chondrytów zwyczajnych uważa się pas planetoid. Planetoidy krążą między orbitami Marsa i Jowisza, w odległości 1,7–4 j.a. od Słońca, orbity niektórych z nich przecinają orbitę Ziemi. Szacuje się, że w pasie planetoid przebywa co najmniej 1000 obiektów o średnicy większej niż 30 km, z których około 200 ma

średnicę większą niż 100 km. Prawdopodobnie około miliona planetoid nie przekracza swoimi rozmiarami 1 km.

Pierwsza z teorii dotyczących pochodzenia pasa planetoid mówi, iż w miejscu tym była niegdyś planeta Faeton, która następnie rozpadła się pod wpływem oddziaływań grawitacyjnych Jowisza. Zgodnie z drugą teorią pas planetoid jest pozostałością materii z czasu formowania się Układu Słonecznego, która nigdy nie weszła w skład żadnej z planet, ale pod wpływem perturbacji grawitacyjnych ze strony planet, zwłaszcza Jowisza, została zepchnięta pomiędzy orbity Marsa a Jowisza (Greeley i Batson, 1999). Największe z tych obiektów na skutek ogrzania uległy procesowi dyferencjacji, co spowodowało, że mają one budowę wewnętrzną podobną do planet ziemskich. Składają się one z metalicznego jądra i krzemianowego płaszcza. Oddziaływania grawitacyjne powodują kolizje między planetoidami, prowadząc do ich rozbicia na mniejsze obiekty i uwalnianie metalicznego jądra. Powstałe w wyniku tego procesu zgrupowania kilku lub kilkunastu planetoid o podobnych elementach orbitalnych nazywamy rodzinami Hirayamy (Artymowicz, 1995).

Chondryty spadające na Ziemię pochodzą głównie z pasa planetoid. Nie znamy dokładnie ciała macierzystego chondrytów zwyczajnych. Dopasowanie widma światła odbitego od powierzchni planetoid do widma światła odbitego od powierzchni meteorytów nie jest łatwe i jednoznaczne, jednak wciąż pozostaje w zasadzie najważniejszym narzędziem badawczym. Przełomem w tych badaniach będzie dopiero możliwość bezpośrednich badań na dużą skalę próbek na asteroidach lub z nich przywiezionych. W chwili obecnej badania takie zostały już zapoczątkowane.

Najpopularniejsze grupy meteorytów mają spektra dobrze pasujące do zaledwie kilku planetoid. 433 Eros swoim składem przypomina grupę LL chondrytów zwyczajnych (Sears, 2004), planetoida 6 Hebe jest ciałem macierzystym chondrytów zwyczajnych z grupy H i meteorytów żelaznych z grupy IIE (Graffey i Gilbert, 1998). Trudności połączenia danej klasy meteorytów z konkretną planetoidą wynikają z faktu, iż mamy do czynienia jedynie z astronomicznymi pomiarami widma światła odbitego oraz laboratoryjnymi analizami meteorytów. Do 2004 roku misje kosmiczne dotarły do 6 planetoid, a kolejne planetoidy zostaną odwiedzone w następnych latach (Sears, 2004). Należy więc uświadomić sobie, jak ważną rolę odgrywają astronomiczne badania widma oraz informacje związane z dynamiką planetoid. Najwięcej informacji dotyczących rozmiarów, kształtu, masy, składu, pola magnetycznego oraz ukształtowania powierzchni planetoid dostarczyła misja NEAR (ang. Near Earth Asteroid Rendezvous). Głównym jej celem było zbadanie planetoidy 433 Eros i 253 Matylda. 13 czerwca 2010 roku powróciła pierwsza sonda, której zadaniem było pobranie próbek z planetoidy 25143 Itokawa. Szczególnie ważna w obliczu badań dotyczących pochodzenia meteorytów spadających na Ziemię wydaje się europejska misja Don Quijote, mająca rozpocząć się w 2011 roku. Jej celem jest sprawdzenie, czy planetoidy oraz meteoroidy można odchylić z ich orbit, np. w celu ich sprowadzenia na orbitę okołozemską lub okołoksiężycową (www.esa.int..., 2010). Jest to kolejny ekspery-

ment prowadzący do urzeczywistnienia eksploatacji pozaziemskich surowców Układu Słonecznego.

Dane dotyczące materiału tworzącego planetoidy czerpie się z analizy widmowej odbitego promieniowania słonecznego. Albedo planetoidy zależy od stopnia sproszkowania minerałów na jej powierzchni. Ma na nie także wpływ rodzaj minerałów oraz obecność niemineralnych składników, takich jak związki organiczne. Kształty badanych widm zależą od oddziaływania światła z atomami w kryształach. Analizując szczegółowo widma światła odbitego od planetoidy możemy wnioskować o ich składzie mineralnym. Mierzone w laboratoriach widma światła słonecznego odbitego od sproszkowanych próbek skał o znanej mineralogii są używane do weryfikacji wniosków dotyczących składu mineralnego planetoid. Szczególnie użyteczne są tu badania widm meteorytów, ponieważ większość z nich pochodzi z planetoid. Podobieństwa pod względem albedo i kształtu krzywych widmowych mogą więc świadczyć o tym, że pewne meteoryty i planetoidy są zbudowane z tych samych minerałów. Planetoidy jasne składają się z żelaza metalicznego, oliwinu i piroksenu. Planetoidy z umiarkowanym albedo przypominają chondryty węgliste, zawierające minerały z grupy serpentynu, magnetyt i związki organiczne (McSween, 1996). Na podstawie spektrum odbitego promieniowania słonecznego wyróżnia się obecnie 16 klas planetoid. Mniej niż 1% planetoid ma spektrum odpowiadające chondrytom zwyczajnym, podczas gdy 95% meteorytów znajdujących na Ziemi to chondryty (Sears, 2004).

Wraz z odległością od Słońca zmienia się także skład planetoid. Grupy dominujące w wewnętrznej części pasa planetoid to obiekty zbudowane z minerałów, które wykryły się ze stopionej magmy. Planetoidy te są prawdopodobnie pozostałościami większych ciał, które kiedyś pokrywała lava, lecz zostały one pozbawione swych skalnych płaszczy wskutek zderzeń, odsłaniając metaliczne jądra. Są one źródłem meteorytów żelaznych (McSween, 1996).

Zupełnie inny skład mineralny mają planetoidy krążące nieco dalej od Słońca. Ciała te zbudowane są z krzemianów i tlenków, powstałych również na skutek działania wody w stanie ciekłym. Planetoidy te mogły być kiedyś mieszaniną lodu i suchej skały, która następnie została ogrzana w wyniku czego lód stopił się i reagował z minerałami krzemianowymi. Najciemniejsze obiekty leżące najdalej w pasie planetoid składają się z lodu, suchych minerałów krzemianowych oraz związków organicznych. Składem swym przypominają one komety, choć mają mniej lodu. Prawdopodobnie lód nigdy nie uległ na nich stopieniu (McSween, 1996).

Duża różnorodność chondrytów, a także samych chondrytów zwyczajnych skłoniła autorów do wybrania jako „przedmiotu badań” jedynie kilku pierwiastków chemicznych (metali) wchodzących w skład minerałów skałotwórczych tych meteorytów. Wybrano spośród nich tylko te, które tworzą łatwo rozpoznawalne i łatwe do odróżnienia od innych, własne minerały. Pozwoliło to przeprowadzić badania przy wykorzystaniu stosunkowo prostych metod i narzędzi badawczych, a jednocześnie umożliwiło uzyskanie bardzo interesujących rezultatów. Badania przeprowadzono jedynie dla wybranych surowców metalicznych, tj. dla żelaza, niklu

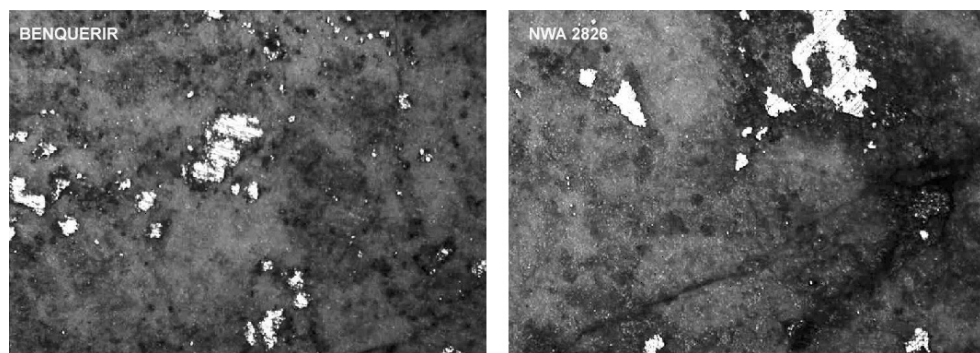
i kobaltu, występujących w ziarnach stopu Fe-Ni oraz w kryształach troilitu (FeS). Autorzy zdają sobie jednak sprawę z tego, że w przyszłości metale te mogą odgrywać znacznie mniejszą rolę w gospodarce człowieka, niż obecnie.

Metody badań

Badania laboratoryjne autorzy prowadzili na wydziale Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej przy użyciu mikroskopu polaryzacyjnego Nikon OPTIPHOT2-POL, sprzężonego z kamerą cyfrową do rejestracji obrazu oraz komputerem PC wyposażonym w oprogramowanie służące do analizy obrazu – LUCIA ver. 3.5. W badaniach mineralogicznych uwzględniono następujące fazy mineralne: kamacyt, taenit, plessyt (fazy krystaliczne stopu FeNi) oraz siarczek – troilit (FeS), jako bardzo łatwe do odróżnienia od pozostałych, głównie krzemianowych składników mineralnych chondrytów zwyczajnych. Nie rozdzielano tych faz, gdyż w pierwszym etapie eksploatacji złoża głównym procesem będzie oddzielenie faz mineralnych o dużej gęstości – stopu FeNi wraz z FeS od skały płonnej – minerałów krzemianowych. Należy pamiętać, że żelazo meteorytowe ulega utlenieniu na skutek przebywania w warunkach ziemskich, przechodząc z formy metalicznej w tlenki i wodorotlenki – stając się tym samym nieprzydatnym (z górniczego punktu widzenia) minerałem. Do badań wybrano więc przede wszystkim próbki meteorytów o stopniu zwietrzenia W0 i W1, dopiero w przypadku gdy niemożliwe było zdobycie próbek o tak niskim stopniu zwietrzenia badano meteoryty, których stopień zwietrzenia sklasyfikowano jako W2. Wysoki stopień zwietrzenia znacznie utrudnia prowadzenie badań, zwłaszcza w świetle przechodzącym, prowadząc do przeszacowania wyników.

Do badań wykorzystano 16 próbek 11 chondrytów zwyczajnych, należących do grup H, L i LL. Badaniom poddano 7 płytek cienkich (3 płytki cienkie Gao Guenie, 2 płytki cienkie Baszkówki, 2 płytki cienkie NWA 4432) oraz 9 zglądów (Tamdakht, Chergach, Tauthe, Zag, Gao-Guenie, Saratov, NWA 869, NWA 2826 i Benquerir). Grupy chemiczne i typy petrograficzne tych chondrytów zwyczajnych przedstawiono w tabeli 1. Badania płytek cienkich prowadzone były w świetle przechodzącym spolaryzowanym pod 1 nikolem. W tych warunkach zliczano fazy mineralne nieprzepuszczające światła (nieprzezroczyste, czarne w obrazie mikroskopowym). Zglądy oraz 1 płytkę cienką (ze względu na wysoki stopień zwietrzenia W2, który praktycznie uniemożliwił wykonanie wiarygodnych badań w świetle przechodzącym), badano w świetle odbitym. Wówczas zliczano powierzchnie ziaren charakteryzujących się wysokim – metalicznym połyskiem (rys. 1). Zestawienie wyników badań mikroskopowych znajduje się w tabeli 1.

W obu przypadkach celem badań była identyfikacja ziaren stopu Fe-Ni i siarczków, a więc minerałów mających potencjalne znaczenie jako surowce metaliczne w chondrytach zwyczajnych. Pod mikroskopem obserwowano 30–80 pól dla każdego meteorytu (w zależności od wielkości danej próbki). Badania prowadzono przy pięciokrotnym powiększeniu obiektywu, a każde pole miało powierzchnię



Rys. 1. Obrazy mikroskopowe zglądów meteorytów Benquerir LL6 oraz NWA 2826 LL5 z widocznymi formami występowania zliczanych ziaren stopu Fe-Ni, o charakterystycznym wysokim połysku metalicznym. Wyraźnie widoczna jest znaczna rozpiętość powierzchni poszczególnych ziaren. Pole powierzchni każdego zdjęcia wynosi $1970 \times 2700 \mu\text{m}$.

$1970 \times 2700 \mu\text{m}$. Na każdym z badanych pól wskazywano ziarna potencjalnych surowców metalicznych (rys. 1). Do zliczania powierzchni zajmowanej w badanym polu przez ziarna potencjalnych rud wykorzystano oprogramowanie LUCIA ver. 3.5. Dostępna w tym programie opcja pozwala na szybkie obliczenie pola powierzchni wskazanego ziarna minerału. Upřednio należy jedynie zdefiniować

Tabela 1. Zestawienie wyników badań mikroskopowych zawartości metali (Fe, Ni i Co) w chondrytach zwyczajnych (i ich ciałach macierzystych) z podziałem na grupy chemiczne i typy petrograficzne. Przedstawiono również rodzaj wykonanych przez autorów badań mikroskopowych i rodzaj badanej próbki.

meteoryt	typ	zawartość metali [% obj.]	błąd pomiaru [\pm % obj.]	rodzaj badań mikroskopowych	rodzaj badanej próbki	średnia zawartość metali dla grupy [% obj.]
Tamdakht	H5	12,11	4,35	światło odbite	zgląd	10,06
Chergach	H5	15,98	5,38			
Tuathe	H4/5	15,99	16,22			
Zag	H3/6	3,11	0,56			
Gao-Guenie	H5	7,05	0,58			
		8,64	0,61			
		7,29	1,11			
		10,34	1,35			
Baszkówka	L5	3,34	1,47	światło przechodzące	plytka cienka	3,86
		6,88	0,37			
NWA 4432	L4	4,74	0,43	światło odbite	zgląd	3,93
		3,70	2,61			
Saratov	L4	2,27	1,04	światło odbite	zgląd	3,93
NWA 869	L4/6	2,20	2,00			
NWA 2826	LL5	5,15	3,09			
Benquerir	LL6	2,70	0,79			

powiększenie obiektywu tak, aby uzyskane wyniki przeliczane były zgodnie ze skalą. Dane o poszczególnych polach powierzchni w każdym z badanych pod mikroskopem pól wyeksportowano do narzędzia Windows – Notatnika, skąd zostały one skopiowane do arkusza kalkulacyjnego Excel w celu wykonania analiz statystycznych. Znając pole powierzchni badanej próbki, które było przedmiotem obserwacji mikroskopowych, oraz sumę powierzchni zliczonych elementów zidentyfikowanych jako potencjalne surowce obliczono jaki procent badanej próbki stanowią rudy, tj. obliczono gęstość powierzchniową. W dalszych obliczeniach przyjęto, że procentowy udział powierzchniowy jest równy procentowemu udziałowi objętościowemu, co wynika z braku kierunkowości i przypadkowości rozłożenia ziaren stopu FeNi i FeS w całej objętości meteorytu. Za błąd pomiaru autorzy przyjęli wartość 2σ (dwukrotną wartość odchylenia standardowego).

Następnie otrzymane wyniki skonfrontowano z danymi pochodzącymi z bazy danych MetBase[®], zawierającej informacje pochodzące ze szczegółowych analiz chemicznych i mineralnych meteorytów. Wykorzystując dane zawarte w MetBase[®] (Koblitz, 2010) przeprowadzono:

- analizę składu chemicznego chondrytów zwyczajnych,
- analizę składu mineralnego chondrytów zwyczajnych,
- analizę pierwiastków akcesorycznych mogących mieć potencjalne znaczenie surowcowe,
- obliczenia zasobów potencjalnych surowców metalicznych dla przykładowych ciał macierzystych chondrytów zwyczajnych.

W celu dalszej obróbki danych z bazy MetBase[®] otrzymane wyniki zostały wyeksportowane do arkusza kalkulacyjnego Excel.

Podczas analizy zawartości minerałów rudnych w chondrytach zwyczajnych należy pamiętać, że meteoryty te nie stanowią jednej spójnej grupy. Zarówno przynależność do grupy chemicznej, jak i typu petrograficznego determinuje zawartość minerałów kruszczowych. Materia chondrytowa poddana badaniom uległa czterem rodzajom przemian, mających wpływ na skład chemiczny i mineralny tych meteorytów. Grupy chemiczne powstały podczas akumulacji materii chondrytowej i tworzenia się ciał macierzystych. Na tym etapie powstawania Układu Słonecznego materia ulegająca akrecji, poddana była segregacji. Stąd pierwotne różnice w składzie chemicznym i izotopowym poszczególnych grup chondrytów. Następnie w dalszej ewolucji ciała macierzyste chondrytów zostały zmetamorfizowane. Pod wpływem wody oraz zmian termalnych powstały typy petrograficzne – są to więc zmiany drugiego rodzaju. Przebywające w przestrzeni kosmicznej ciała macierzyste chondrytów ulegały licznym zderzeniom i kolizjom, w wyniku których w meteorytach obserwuje się zmiany szokowe. Stopnie szokowe są więc wariacjami trzeciego rodzaju, powstałymi w wyniku znacznej prędkości uderzeń. Widoczne są one w postaci odkształconych ziaren minerałów, pęknięć, stopionych żył, przekryształizowanych minerałów oraz powstałych brekcji. Zmiany czwartego rodzaju wywołane są przebywaniem meteorytów na powierzchni Ziemi. W warunkach zie-

mskich minerały budujące chondryty ulegają zwierzaniu oraz utlenieniu – stąd stopnie zwierzania.

W interpretacji wyników należy również uwzględnić błąd pomiaru, który autorzy przyjęli na poziomie 2σ . Błędy powstałe podczas badań mikroskopowych mogą wynikać z niejednorodności badanych meteorytów, dużego rozproszenia minerałów i jego zmian w przestrzeni meteorytu, dużej rozpiętości rozmiarów ziaren mineralnych, niewielkich rozmiarów ziaren (których zliczenie było niemożliwe ze względu na ograniczone możliwości programu). Istotny wpływ na prowadzone badania miał także stopień zwierzania meteorytu.

Dyskusja wyników

Największą zawartość minerałów rudnych (10,06% obj.) stwierdzono w chondrytach zwyczajnych pochodzących z grupy H, a więc grupy chemicznej bogatej w metale. Grupy L i LL mają podobną zawartość minerałów będących rudami metali, odpowiednio 3,86% obj. i 3,93% obj. (tab. 1). Obliczone przez autorów wartości są ogólnie zgodne ze znanymi wcześniej danymi odnośnie poszczególnych grup chemicznych chondrytów zwyczajnych. Istotny jest tu jednak fakt, że żelazo występuje w grupach L i LL na różnym stopniu utlenienia. Choć dane te są do siebie zbliżone należy zaznaczyć, że przyjęta metoda badań nie pozwoliła we wszystkich przypadkach jednoznacznie stwierdzić, czy badaniem minerałem kruszcowym był stop FeNi, czy troilit. Ograniczone możliwości programu LUCIA sprawiły, że w przypadku, gdy ziarna tych dwóch minerałów występowały obok siebie zmierzenie powierzchni dla każdego z nich z osobna było bardzo trudne, a w niektórych przypadkach wręcz niemożliwe. Grupy L i LL różnią się zawartością żelaza w formie metalicznej. Grupa LL zawiera bardziej zredukowane związki żelaza. Nie zmienia się natomiast zawartość siarczku żelaza w tych grupach (Hutchison, 2004).

Średnie zawartości metali w poszczególnych grupach chondrytów zwyczajnych znacznie odbiegają od wyników uzyskanych dla pojedynczych meteorytów. Jest to szczególnie wyraźnie widoczne w przypadku chondrytu Zag. Ze względu na trudności w identyfikacji minerałów rudnych, co skutkuje małą stwierdzoną zawartością tych minerałów, w średniej grupowej pominięto wyniki otrzymane dla tego meteorytu. Jest to spowodowane jego różnorodnością budowy, o czym świadczy m.in. typ petrograficzny H3/6. Wobec uzyskanych wyników badań zachodzi konieczność przeprowadzenia badań większej liczby meteorytów, aby wykluczyć możliwość istnienia tak dużych rozpiętości na planetoidach (co mogłoby utrudnić szacowanie zasobów).

W celu zweryfikowania wyników własnych badań mikroskopowych porównano je z wynikami analiz przeprowadzonych w oparciu o dane chemiczne pochodzące z MetBase® (Koblitz, 2010). Ponieważ zawartość minerałów rudnych metali ustalona na podstawie badań mikroskopowych wyrażona była w procentach objętościowych, a dane z MetBase® w procentach wagowych konieczne było sprowadze-

nie wyników do takich samych jednostek. Dane uzyskane z MetBase[®] zostały więc przeliczone zgodnie z poniższym wzorem:

$$V = \frac{m}{\rho},$$

gdzie:

V – gęstość objętościowa [% obj.],

m – zawartość potencjalnych rud [% wag.] (dane MetBase),

ρ – gęstość (dane z MetBase[®]) równanie $\left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$

Dla uproszczenia dalszych szacunków założono, że ziarna stopu Fe-Ni składają się tylko z atomów Fe i Ni i niewielkiej domieszki Co, a w składzie troilitu zaniebano siarkę.

Zarówno dla typu H5, jak i dla wartości średniej dla grupy H wartości dotyczące zawartości metali, pochodzące z badań pod mikroskopem są większe, niż wynika to z analiz chemicznych zawartych w MetBase[®] (nawet przy założeniu, maksymalnego błędu $2\sigma = 4,22\%$ obj.) (tab. 2). Być może homogenizacja materii badanych meteorytów zaszła za daleko. Niezgodność wyników może być także rezultatem nierównomiernego rozmieszczenia metali w meteorycie – badane fragmenty meteorytów mogły być wzbogacone w minerały rudne. Najbardziej jednak prawdopodobną przyczyną było zbadanie zbyt małej liczby meteorytów.

Należy także zaznaczyć, że badaniom mikroskopowym i analizom chemicznym zostały poddane różne fragmenty meteorytów, stąd mogą także wynikać pewne różnice w zawartości metali. Ponadto badania pod mikroskopem i analizy chemiczne zostały wykonane w różnym czasie, a pod wpływem warunków ziemskich mogło dojść do utlenienia żelaza, co utrudniło analizę obrazu pod mikroskopem i pozornie zwiększyło ilość minerałów kruszczowych.

Z braku dostępu oraz z powodu niewykonania analiz chemicznych konkretnych meteorytów wynika konieczność porównywania wyników badań autorów uzyskanych dla danego meteorytu z wartością średniej dla grupy chemicznej, do jakiej należy ten meteoryt. Duża zawartość minerałów rudnych może być cechą chara-

Tabela 2. Porównanie wyników badań mikroskopowych i wyników obliczeń na podstawie danych z MetBase[®] zawartości metali w chondrytach grupy H.

Typ chondrytu	Dane z MetBase [®] (według Koblitz, 2010)						Dane z mikroskopu		
	Fe met. [% wag.]	FeS [% wag.]	Ni [% wag.]	Co [% wag.]	metale [% wag.]	gęstość [g/cm ³]	Fe, Ni, Co [% obj.]	Fe, Ni, Co [% obj.]	błąd pomiaru [±% obj.]
H3	9,38	4,02	1,24	0,05	14,70	3,39	4,33	–	
H4	13,94	5,55	1,49	0,07	21,04	3,39	6,21	–	
H5	11,98	4,36	1,32	0,06	17,73	3,39	5,22	11,51	4,22
H6	12,27	4,45	1,39	0,05	18,17	3,42	5,31	–	
średnio H	11,89	4,60	1,36	0,06	17,91	3,40	5,27	11,51	4,22

kterystyczną danego meteorytu, czego średnia grupowa może w pełni nie odzwierciedlać. Niemniej jednak wyniki badań przeprowadzonych pod mikroskopem są interesujące i rozsądnie spójne, jak na niewielką liczbę analizowanych meteorytów (złądów i płytek cienkich).

Wyniki badań mikroskopowych i analiz chemicznych z MetBase® dla grupy L są porównywalne, przy założeniu błędu podczas badań pod mikroskopem równego 2σ (tab. 3). Podobne wartości uzyskano zarówno dla typu petrograficznego L5, jak i L6. Wartości dla średniej grupowej udało się wyznaczyć najdokładniej – wyniki różnią się 0,33% obj., co mieści się w granicach przyjętego błędu pomiaru. Tym niemniej mała liczba badanych meteorytów powinna w najbliższej przyszłości ulec zwiększeniu, gdyż taka zbieżność przy małej liczbie analiz może być przypadkowa.

Tabela 3. Porównanie wyników badań mikroskopowych i wyników obliczeń na podstawie danych z MetBase® zawartości metali w chondrytach grupy L.

Typ chondrytu	Dane z MetBase® (według Koblitz, 2010)							Dane z mikroskopu	
	Fe met [% wag.]	FeS [% wag.]	Ni [% wag.]	Co [% wag.]	Fe, Ni, Co [% wag.]	gęstość [g/cm ³]	Fe, Ni, Co [% obj.]	Fe, Ni, Co [% obj.]	błąd pomiaru [±% obj.]
L3	5,59	1,11	0,05	6,07	12,82	3,27	3,92	–	
L4	7,16	1,16	0,05	6,34	14,71	3,32	4,43	–	
L5	7,01	1,14	0,06	5,89	14,09	3,34	4,22	3,57	0,92
L6	6,75	1,14	0,06	6,06	14,01	3,36	4,17	5,11	1,52
średnio L	6,63	1,14	0,05	6,09	13,91	3,32	4,19	3,86	1,22

Zawartość metali w grupie LL wyznaczona podczas badań pod mikroskopem i z analiz chemicznych z wykorzystaniem MetBase® (Koblitz, 2010) jest zbliżona, jeśli przyjąć błąd pomiaru pod mikroskopem. Najdokładniejsze wartości wyznaczono dla grupy LL6 – wyniki różnią się od wartości średniej z analiz chemicznych o jedynie 0,08% obj. (tab. 4). Należy jednak dodać, że błędy w tym przypadku są

Tabela 4. Porównanie wyników badań mikroskopowych i wyników obliczeń na podstawie danych z MetBase® zawartości metali w chondrytach grupy LL.

Typ chondrytu	Dane z MetBase® (według Koblitz, 2010)							Dane z mikroskopu	
	Fe met [% wag.]	FeS [% wag.]	Ni [% wag.]	Co [% wag.]	metale [% wag.]	gęstość [g/cm ³]	Fe, Ni, Co [% obj.]	Fe, Ni, Co [% obj.]	błąd pomiaru [±% obj.]
LL3	2,03	0,78	0,03	4,72	7,56	3,27	2,31	–	
LL4	2,82	0,92	0,04	5,50	9,27	3,36	2,76	–	
LL5	4,18	0,82	0,05	5,73	10,78	3,23	3,33	5,15	3,09
LL6	1,96	0,87	0,05	5,52	8,40	3,21	2,62	2,7	0,79
LL7	1,49	0,65	0,02	4,15	6,31	3,27	1,93	–	
średnio LL	2,50	0,81	0,04	5,12	8,46	3,27	2,59	3,93	1,94

duże. Badany chondryt należący do tej grupy – Benquerir posiadał stopień zwierzchności W0, co jak widać znacząco wpłynęło na dokładność pomiarów pod mikroskopem. Niestety mankamentem wykonanych badań jest zbyt mała liczba przeanalizowanych okazów.

Ze względu na ograniczony dostęp do analiz chemicznych badanych pod mikroskopem meteorytów porównanie wyników badań było możliwe tylko dla dwóch z nich – Baszkówki L5 i Saratova L4 (tab. 5). Dane dotyczące składu chemicznego chondrytu Baszkówka pochodzą z publikacji Siemiątkowskiego (2001) oraz Dybczyńskiego i współautorów (2001), natomiast składu chondrytu Saratov z MetBase® (Koblitz, 2010).

Tabela 5. Porównanie wyników badań mikroskopowych autorów dotyczących zawartości wybranych metali z wynikami analiz chemicznych dla meteorytu Baszkówka L5 (według Siemiątkowski, 2001 oraz Dybczyński i in., 2001) oraz meteorytu Saratov L4 (według MetBase®; Koblitz, 2010).

pochodzenie danych	zawartość	Saratov L4	Baszkówka L5
analizy chemiczne	Fe [% wag.]	8,34	6,89
	Ni [% wag.]	1,16	2,01
	Co [% wag.]	0,04	0,06
	FeS [% wag.]	5,77	5,10
	minerały rudne [% wag.]	15,31	13,00
	gęstość [g/cm ³]	3,32	3,34
	minerały rudne [% obj.]	4,61	3,89
badania mikroskopowe autorów	minerały rudne [% obj.]	2,27±1,40	5,10±1,84

Wyniki analiz chemicznych (4,61% obj.) i badań mikroskopowych w świetle odbitym (2,27±1,40% obj.) dla chondrytu Saratov są różne. Może to świadczyć o niejednorodności meteorytu, co potwierdza także duża rozpiętość wielkości ziaren minerałów rudnych. Być może lepsze wyniki uzyskano by po analizie większej liczby próbek tego meteorytu (autorzy mieli dostęp tylko do jednego zglądu).

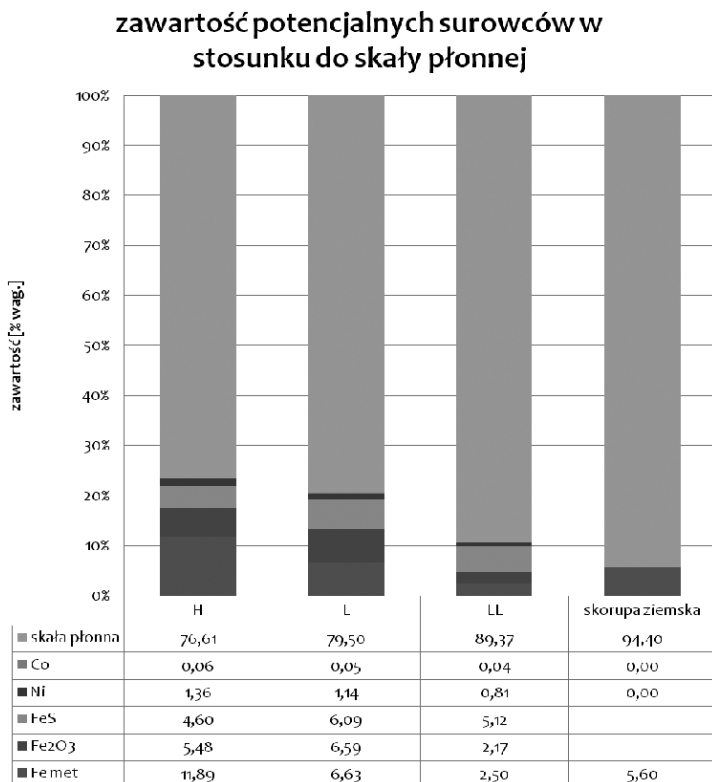
Zawartość minerałów rudnych w chondrycie Baszkówka (L5) określona na podstawie badań mikroskopowych w świetle przechodzącym (5,10±1,84% obj.) jest porównywalna z wynikami analiz chemicznych (3,89% obj.), mieści się w granicach błędu. Świadczy to o dobrze przyjętej metodzie oraz prawidłowo przeprowadzonych badaniach mikroskopowych, które ze względu jednak na małą liczbę płytek cienkich poddanych analizie obarczone są dużym błędem.

Jak wynika z przedstawionej powyżej analizy badań mikroskopowych i odniesienia ich wyników do danych z analiz chemicznych wielu meteorytów, tak prosta metoda badań, jak planimetrowanie – zliczanie powierzchni minerałów rudnych pod mikroskopem, przy odpowiednio dużej liczbie próbek może dać wiarygodne wyniki dotyczące zawartości potencjalnych surowców znajdujących się na ciałach macierzystych badanych chondrytów zwyczajnych. W związku z tym badania te będą kontynuowane. Ze względu na małą liczbę dostępnych do badań mikro-

powych chondrytów autorzy dalsze analizy prowadzili w oparciu o dane chemiczne zawarte w bazie MetBase®.

Obserwowana pod mikroskopem duża zawartość ziaren stopu Fe-Ni oraz mniejsza, aczkolwiek wciąż znaczna ilość troilitu w chondrytach zwyczajnych, skłoniła autorów do odniesienia jej do skał skorupy ziemskiej, gdzie metale te tworzą eksploatowane złoża. Zasadniczą różnicą w budowie skał macierzystych chondrytów zwyczajnych i skał skorupy ziemskiej było przejście w przypadku materiału ziemskiego m.in. przez proces dyferencjacji magmowej, którego nie przeszły ciała macierzyste badanych meteorytów. Jak wynika z rysunku 2 proces ten wraz z innymi procesami geologicznymi zachodzącymi w skorupie ziemskiej z jednej strony pozwolił na powstanie ciał (obszarów) wzbogaconych w metale na Ziemi, które nazywamy złożami, podczas gdy planetoidy praktycznie w całości należało by według ziemskich kryteriów uznać za złoża.

Ze względu na brak danych o rozdziale żelaza na poszczególne jego związki dla potrzeb wykresu (rys. 2), przyjęto całkowitą zawartość żelaza w skorupie ziemskiej na 5,6% wag., jako równą zawartości żelaza metalicznego. Rzeczywisty jego udział w minerałach rudnych jest z pewnością mniejszy.



Rys. 2. Zawartość wybranych potencjalnych surowców metalicznych [% wag.] w stosunku do skały płonnej na ciałach macierzystych chondrytów zwyczajnych w podziale na grupy chemiczne i w odniesieniu do skorupy ziemskiej. Opracowano na podstawie danych z MetBase® dla 1059 chondrytów zwyczajnych (Koblitz, 2010) i danych dla skorupy ziemskiej według (Craig i in., 2003).

Rysunek 2 przedstawia proporcje metali: Fe, Ni i Co w stosunku do skały płonnej w poszczególnych grupach chondrytów. Najbardziej obfita w metale jest grupa H – właściwie 25% takiego chondrytu można uznać za rudę. Grupa L zawiera 21% potencjalnych surowców metalicznych. Nawet najbardziej uboga w metale grupa LL (11%) zawiera ich znacznie więcej, niż przeciętne eksploatowane na Ziemi złoża. Według ziemskich kategorii właściwie całe ciała macierzyste wszystkich grup chondrytów zwyczajnych można uznać za złoża metali. Minerale rudne występują na nich w formie rodzimej lub siarczków, a więc w podobnej jak na Ziemi. Znamy już procesy przeróbki takich minerałów. Ich eksploatacja jest więc tylko kwestią czasu. Należy tutaj zaznaczyć, że badano zawartość minerałów rudnych w najbardziej ubogiej w metale grupie meteorytów kamiennych. Zasoby tkwiące na ciałach macierzystych meteorytów żelaznych i żelazno-kamiennych są więc o rzędy wielkości większe, a w odniesieniu do dostępnych zasobów złóż ziemskich są wręcz niewyobrażalnie duże.

Tak duża zawartość minerałów rudnych w grupie H (25%) odpowiada kryterium, przy którym złoża żelaza uważa się za bilansowe (Nieć, 1994). Pozostałe dwie grupy chondrytów zwyczajnych mają mniejszą zawartość Fe niż wartości wskazane w kryteriach bilansowości złóż kopalin. Należy jednak pamiętać, że kryteria te zostały ustanowione dla warunków ziemskich, gdzie eksploatuje się złoża Fe do głębokości 500 m. Na planetoidach strefy bogato okruszczone występują na powierzchni lub tuż pod nią, w związku z czym ich koszt wydobycia jest znacznie mniejszy, niż w przypadku głęboko zalegających złóż ziemskich. Ponadto obecność regolitu znacznie ułatwia proces rozdrobnienia potencjalnego urobku. Kolejnym istotnym czynnikiem jest obecność żelaza w formie rodzimej na powierzchni, co sprawia, że zbędny staje się proces przeróbki. Nie bez znaczenia jest też zawartość innych metali, w tym znacznie większy (10–20 krotnie większy) udział platynowców (Lewis, 1997). Zawartość minerału rudnego uważana za bilansową, zależy także w znacznym stopniu od ceny surowca na giełdzie oraz od zapotrzebowania na ten surowiec. Nie bez znaczenia jest także odległość transportu i jego koszt, co w przypadku orbity Marsa lub orbity Ziemi może preferować modyfikację orbit planetoid. Czynniki te sprawiają, że ciała macierzyste chondrytów zwyczajnych stają się niezwykle atrakcyjnym obiektem przyszłej eksploatacji.

Znając zawartość potencjalnych surowców metalicznych w ciałach macierzystych chondrytów zwyczajnych autorzy oszacowali zasoby znajdujące się na przykładowych planetoidach. Przy obliczeniach przyjęto następujące założenia upraszczające:

- planetoida 6 Hebe, uważana za ciało macierzyste chondrytów zwyczajnych grupy H, jest jednorodnym ciałem zbudowanym z materii chondrytowej o zawartości minerałów rudnych odpowiadających chondrytom z grupy H (należy wziąć pod uwagę, że planetoidy mogą posiadać zróżnicowane wewnętrznie struktury z żelazno-niklowym jądrem, a więc zawartość potencjalnych metali może być większa niż obliczona);

- planetoida 433 Eros, uważana za ciało macierzyste chondrytów zwyczajnych grupy LL, jest jednorodnym ciałem zbudowanym z materii chondrytowej o zawartości minerałów rudnych odpowiadających chondrytom z grupy LL;
- planetoida 11 Parthenope uważana jest za ciało macierzyste chondrytów bez wskazania, jakiej grupy meteoryty mogą z niej pochodzić – dlatego obliczeń dokonano dla grup H i LL (zawierającej najwięcej i najmniej metali), by określić maksymalne i minimalne zasoby surowców; podobnie jak w powyższych przypadkach przyjęto, że cała planetoida jest jednorodnym ciałem zbudowanym z materii odpowiadającej chondrytom pochodzącym z podanych grup;
- kobalt i nikiel występują wyłącznie w formie metalicznej, wchodzi w skład taenitu i kamacytu – nie występują w formie rozproszonej jako domieszki w krzemianach, nie wchodzi w skład innych minerałów;
- dane dotyczące masy planetoid wybranych do oszacowania zasobów pochodzą z obliczeń Baera (2008).

Jak wynika z tabeli 6 zawartość żelaza na potencjalnych ciałach macierzystych chondrytów zwyczajnych grup H i L jest większa niż w skorupie ziemskiej. Jedynie grupa LL zawiera go mniej – należy jednak pamiętać, że wartość 5,6% wag. dla skorupy ziemskiej to wartość całego żelaza zawartego w skorupie, bez rozdziału na występujące w minerałach rudnych i wchodzące w skład minerałów skał płonnych. Gdyby porównać całkowitą zawartość w meteorytach, to jego ilość nawet w najuboższej w metale grupie LL byłaby dwukrotnie większa, niż w skorupie ziemskiej (por. rys. 2).

Kobalt na planetoidach występuje w 15–24-krotnie większym stężeniu, niż w skorupie ziemskiej. Ciała macierzyste chondrytów zwyczajnych zawierają o 100–180 razy więcej niklu niż skały skorupy ziemskiej. Nawet najuboższa w nikiel grupa LL zawiera go o 1,6-razy więcej, niż złoża ziemskie, a grupa H nawet 2,7-razy więcej.

Znając produkcję żelaza, kobaltu i niklu na Ziemi w chwili obecnej (Craig i in., 2003) autorzy obliczyli na jak długo potencjalne surowce pochodzące z przykłado-

Tabela 6. Potencjalne zasoby wybranych surowców metalicznych na wybranych planetoidach oszacowane przez autorów na podstawie składu chemicznego chondrytów zwyczajnych (według MetBase[®]; Koblitz, 2010) w odniesieniu do zasobów skorupy ziemskiej. Masa planetoid według (Baer, 2008). Światowa produkcja i zawartość w złożu według (Craig i in., 2003 oraz Nieć, 1994).

ciało niebieskie	typ	masa [kg]	Fe met. [%wag.]	Co [%wag.]	Ni [%wag.]	Fe met. [t]	Co [t]	Ni [t]
6 Hebe	H	$1,4 \cdot 10^{19}$	11,89	0,06	1,36	$1,66 \cdot 10^{15}$	$8,4 \cdot 10^{12}$	$1,90 \cdot 10^{14}$
433 Eros	LL	$6,69 \cdot 10^{15}$	6,63	0,05	1,14	$4,43 \cdot 10^{11}$	$3,35 \cdot 10^9$	$7,63 \cdot 10^{10}$
11 Parthenope	H	$5,13 \cdot 10^{18}$	11,89	0,06	1,36	$6,10 \cdot 10^{14}$	$3,08 \cdot 10^{12}$	$6,98 \cdot 10^{13}$
	LL		2,50	0,04	0,81	$1,28 \cdot 10^{14}$	$2,05 \cdot 10^{12}$	$4,16 \cdot 10^{13}$
Ziemia	–	$2,6 \cdot 10^{22}$	5,6	0,0025	0,0075	$1,46 \cdot 10^{18}$	$6,5 \cdot 10^{14}$	$1,95 \cdot 10^{15}$
światowa produkcja [t/rok]	–					$1 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^6$
zawartość w złożu	–		25	1	0,5	–		

wych planetoid mogłyby zaspokoić nasze obecne zapotrzebowanie na te metale. Wyniki obliczeń zawarte są w tabeli 7. W związku z tym misja Don Quijote może przynieść odpowiedź nie tylko na pytanie, czy możliwe jest sprowadzenie złóż (asteroidów) na orbitę okołozemską lub okołomarsjańską, ale także jak duży zysk można osiągnąć z eksploatacji wobec możliwych już niedługo do oszacowania kosztów zmiany orbity oraz zasobów złóż wybranych planetoid.

Biorąc pod uwagę produkcję tych metali w ciągu roku – zasoby żelaza, niklu i kobaltu pochodzące z Erosa, najmniejszej z analizowanych planetoid, wystarczyłyby na najbliższe ponad sto lat (żelazo) oraz kilkadziesiąt tysięcy lat według dzisiejszej produkcji (nikiel i kobalt) (tab. 7). Dla pozostałych analizowanych planetoid zasoby tych potencjalnych surowców zaspokoiłyby nasze potrzeby na żelazo przez najbliższe kilkaset tysięcy do ponad miliona lat, a kobalt i nikiel od kilkudziesięciu do kilkuset milionów lat!

Tabela 7. Oszacowany przez autorów czas, na jaki wystarczyłyby zasoby wybranych potencjalnych surowców metalicznych pochodzących z wybranych planetoid, przy założeniu dzisiejszej produkcji żelaza, kobaltu i niklu na Ziemi. Ziemska produkcja metali przyjęta na podstawie (Craig i in., 2003).

ciało niebieskie	Fe	Co	Ni
produkcja [t/rok]	1 000 000 000	30 000	1 200 000
6 Hebe [lat]	1 664 600	280 000 000	158 666 666
433 Eros [lat]	167	89 200	45 157
11 Parthenope [lat]	609 957	102 600 000	58 140 000
	128 250	68 400 000	34 627 500

Wnioski

Badania mikroskopowe autorów, przeprowadzone analizy statystyczne oraz obliczenia prowadzą do poniższych wniosków.

Na podstawie badań mikroskopowych stwierdzono, że największą zawartością minerałów rudnych Fe, Ni i Co (10,06% obj.) wśród chondrytów zwyczajnych charakteryzują się meteoryty z grupy H, a więc grupy chemicznej bogatej w metale. Chondryty grupy L i LL mają podobną zawartość tych metali, odpowiednio 3,86% obj. i 3,93% obj. Wyniki tych wstępnych badań pokazują z jednej strony użyteczność prostej metody badań mikroskopowych, a z drugiej wskazują na konieczność wykonania znacznie większej liczby pomiarów, aby uzyskać dane zgodne z dotychczasowymi wynikami szczegółowych analiz chemicznych.

Wszystkie cywilizacje techniczne bazują na umiejętności wytwarzania metali. Z przeprowadzonych na potrzeby tej pracy badań mikroskopowych chondrytów zwyczajnych wynika, że Fe, Ni, i Co należą do metali, których zawartość w chondrytach zwyczajnych jest największa. Ciała macierzyste tych meteorytów zawierają znacznie większe koncentracje żelaza, niklu i kobaltu niż przeciętne złoża ziemskie (w skorupie ziemskiej). Zawartość żelaza na potencjalnych ciałach macierzystych chondrytów zwyczajnych grup H i L jest większa niż w skorupie ziemskiej. Jedynie

grupa LL zawiera go mniej – należy jednak pamiętać, że wartość 5,6% wag. dla skorupy ziemskiej to wartość dla całego żelaza zawartego w skorupie, bez rozdziału na występujące w minerałach rudnych i wchodzące w skład skał płonnych. Gdyby porównać całkowitą zawartość żelaza w chondrytach, to jego zawartość nawet w najuboższej w metale grupie LL byłaby dwukrotnie większa, niż dla skorupy ziemskiej. Kobalt na planetoidach występuje w 15–24-krotnie większym stężeniu, niż w skorupie ziemskiej. Ciała macierzyste chondrytów zwyczajnych zawierają 100–180 razy więcej niklu niż skały skorupy ziemskiej. Nawet najuboższa w metale grupa chondrytów zwyczajnych LL ma 1,6 razy bogatszą, a grupa H nawet 2,7 razy bogatszą, koncentrację niklu, niż ziemskie złoża.

Pas planetoid wydaje się być dogodnym miejscem poszukiwania i rozpoznawania potencjalnych surowców. Znajduje się on w centralnej części Układu Słonecznego, a więc w miejscu gdzie występują wszystkie rodzaje pierwiastków chemicznych (zarówno lotne, jak i trudnotopliwe). To położenie jest również strategicznym miejscem do przyszłej eksploracji kosmosu. Ponadto obiekty znajdujące się w pasie planetoid występują w środowisku słabej grawitacji. Powierzchnie planetoid pokryte są warstwą regolitu składającego się z materiału budującego powierzchnię oraz materiału „impaktorów”. Biorąc pod uwagę skład planetoid (wnioskowany na podstawie badań widma światła odbitego oraz składu meteorytów) całą planetoidę można uważać za nagromadzenie rozdrobnionych minerałów krzemianowych, siarczków oraz FeNi. Bogaty w rudy metali regolit na planetoidach można więc traktować (zgodnie z ziemskim nazewnictwem) jako luźne złożo rozsypiskowe. Ewentualna eksploatacja takiego złoża w przyszłości będzie więc ułatwiona – nie będzie konieczne użycie materiałów wybuchowych do wstępnego rozdrobnienia kopaliny. Wystarczy jedynie zebranie powstałego w wyniku wielu kosmicznych kolizji „urobku”. Duża zawartość metali sprawia, że zgodnie z ziemskimi kryteriami całe planetoidy mogą być traktowane jako złoża.

Przeprowadzone na podstawie badań mikroskopowych oraz analiz chemicznych chondrytów zwyczajnych obliczenia dla przykładowych planetoid pokazują, że zasoby potencjalnych surowców metalicznych znajdujących się na planetoidach są olbrzymie. Biorąc pod uwagę aktualną roczną produkcję metali na Ziemi – zasoby żelaza, niklu i kobaltu pochodzące z planetoidy 433 Eros, najmniejszej z analizowanych planetoid, wystarczyłyby na najbliższe ponad sto lat do kilkudziesięciu tysięcy lat. Zasoby pochodzące z planetoid 6 Hebe i 11 Parthenope zaspokoilyby nasze potrzeby na żelazo przez najbliższe od ponad stu tysięcy do ponad miliona lat, a na kobalt i nikiel nawet do kilkuset milionów lat. Obliczenia zostały wykonane dla 3 przykładowych ciał pochodzących z pasa planetoid. Należy pamiętać, że pas ten zawiera tysiące podobnych ciał oraz miliony mniejszych. Ponadto jest on źródłem meteorytów żelaznych, będących czystym stopem żelazo-niklowym. W pasie tym znajdują się więc znacznie bogatsze w minerały rudne planetoidy, chociaż zapewne trudniejsze do eksploatacji. Pas planetoid jest właściwie niewyczerpanym źródłem surowców, biorąc pod uwagę nasze obecne zapotrzebowanie.

Ponadto z przeprowadzonych badań i analiz wynika, że do metali pospolitych, tj. takich, dla których zawartość w skorupie ziemskiej jest większa niż 0,1% wag.,

występujących na ciałach macierzystych zaliczyć należy obok żelaza także nikiel. Jego zawartość w skałach ciał macierzystych chondrytów zwyczajnych wynosi 0,5% wag., podczas gdy na Ziemi nie jest on metalem pospolitym.

Pas planetoid jest bogatym źródłem surowców, mogących mieć kluczowe znaczenie dla dalszego rozwoju ziemskich i pozaziemskich osiedli ludzkich. Zasoby tych surowców mierzone skalą dzisiejszego na nie zapotrzebowania można uznać za praktycznie niewyczerpywalne. Dopóki nie dysponujemy odpowiednimi technologiami eksploatacji tych zasobów naturalnych, wiedza o nich nie jest równoznaczna z posiadaniem przydatnych surowców mineralnych. Mimo to jednak nie można przechodzić obok nich obojętnie. Naszym obowiązkiem jest zadbać o to, aby kiedy tylko zajdzie taka potrzeba można było z zasobów tych korzystać. W tym celu niezbędne jest kontynuowanie bardziej szczegółowych i zakrojonych na szeroką skalę badań nad występowaniem wszelkich surowców poza Ziemią, w tym szczególnie w Układzie Słonecznym. Perspektywa ich eksploatacji jest zapewne bliższa, niż się nam w chwili obecnej wydaje.

Powyższe wnioski dotyczą jedynie trzech wybranych metali pospolitych występujących w składzie chondrytów zwyczajnych. Znacznie ciekawszym zagadnieniem będzie rozpatrzenie występowania w pasie planetoid innych surowców metalicznych, np. metali ziem rzadkich, metali szlachetnych, a także surowców chemicznych, czy też bardzo istotnego surowca, jakim poza Ziemią będzie z pewnością woda. Te zagadnienia będą z pewnością przedmiotem przyszłych dociekań i badań.

Podziękowania

Autorzy pragną podziękować kolekcjonerom meteorytów Tomaszowi Jakubowskiemu oraz Marcinowi Cimale, którzy wypożyczyli przygotowane do badań pod mikroskopem próbki chondrytów zwyczajnych.

Artykuł ten powstał w oparciu o pracę magisterską Katarzyny Łuszczek, uznaną przez Polskie Towarzystwo Mineralogiczne za najlepszą w Polsce pracę magisterską z dziedziny nauk mineralogicznych w 2010 roku. Praca ta została obroniona z oceną celującą na Wydziale Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej.

Streszczenie

W artykule autorzy przedstawili prostą metodę określania zawartości wybranych surowców metalicznych (Fe, Ni, Co) na ciałach macierzystych chondrytów zwyczajnych. Dzięki zastosowaniu planimetrowania pod mikroskopem zgładów meteorytów możliwe jest dość dokładne oszacowanie procentowej zawartości tych metali w skałach macierzystych meteorytów – na planetoidach. Wyniki te w przypadku analizy dużej liczby zgładów będą zapewne porównywalne ze znacznie droższymi wynikami analiz chemicznych meteorytów. Na podstawie analizy 16 płytek cienkich i zgładów 11 chondrytów zwyczajnych autorzy stwierdzili, że największą zawartość minerałów rudnych Fe, Ni i Co mają chondryty zwyczajne z grupy H

i wynosi ona 10,06% obj. Dla chondrytów zwyczajnych z grup L i LL jest ona równa odpowiednio 3,86% i 3,93% obj.

Autorzy, wykorzystując wyniki analiz chemicznych dostępnych w źródłach literaturowych, oszacowali także zasoby Fe, Ni i Co dla kilku wybranych planetoid. Ciała te zawierają większe koncentracje żelaza, niklu i kobaltu niż złoża ziemskie (w skorupie ziemskiej). Całkowita zawartość Fe na ciałach macierzystych nawet najuboższej w metale grupy chondrytów zwyczajnych LL jest około dwukrotnie większa, niż w skorupie ziemskiej. Kobalt występuje na planetoidach macierzystych chondrytów zwyczajnych w 15–24-krotnie większym stężeniu, niż w skorupie ziemskiej, a koncentracje Ni są 100–180 razy większe, niż w skorupie ziemskiej. Zawartości tych metali są także kilkukrotnie większe na planetoidach macierzystych chondrytów zwyczajnych, niż w eksploatowanych obecnie złożach w skorupie ziemskiej.

Uwzględniając średnią roczną ziemską produkcję tych metali autorzy oszacowali, że planetoida macierzysta chondrytów zwyczajnych o wielkości pomiędzy 433 Eros a 6 Hebe może zaspokoić nasze zapotrzebowanie na Fe, Ni i Co przez najbliższe od kilkuset lat do ponad 100 milionów lat. Biorąc pod uwagę fakt, że w pasie planetoid występuje wiele takich obiektów oraz równie wiele planetoid zbudowanych głównie ze stopu Fe-Ni należy uznać ten rejon Układu Słonecznego za praktycznie niewyczerpane źródło surowców metalicznych. Perspektywa ich eksploatacji jest zapewne znacznie bliższa, niż się nam w chwili obecnej wydaje.

Literatura

- Artymowicz P., 1995. *Astrofizyka układów planetarnych*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Baer J., 2008. *Recent Asteroid Mass Determinations*. <http://home.earthlink.net/~jimbaer1/ast-mass.txt> (15.06.2010).
- Craig J. R., Vaughan D. J., Skinner B. J., 2003. *Zasoby Ziemi*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Dybczyński R., Chwastowska J., Danko B., Kulisa K., Polkowska-Motrenko H., Samczyński Z., Sterlińska E., Szopa Z., 2001. *A study on chemical composition of Baszkówka and Mt. Tazewait chondrites*. Geological Quarterly, vol. 45 (3), str. 289–301.
- Faure G., 2004. *Description of the system of asteroids as of May 20, 2004*. www.astrosurf.com (27.10.2009).
- Graffey M. J., Gilbert S. L., 1998. *Asteroid 6 Hebe: The probable parent body of the H Type ordinary chondrites and the IIE iron meteorites*. Meteoritics and Planetary Science, vol. 33, pp. 1281–1295.
- Greeley R., Batson R., 1999. *Atlas Układu Słonecznego NASA*. Prószyński i spółka, Warszawa.
- Hurnik B., Hurnik H., 2005. *Materia kosmiczna na Ziemi, jej źródła i ewolucja*. Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań.
- Hutchison R., 2004. *Meteorites a petrologic, chemical and isotopic synthesis*. Cambridge University Press, New York.
- Koblitz J., 2010. *MetBase® 7.3 Meteorite Data Retrieval Software*. Ritterhude, Germany.

- Lewis J. S., 1997. *Mining the Sky: Untold Riches from the Asteroids, Comets and Planets*. Perseus Publishing, USA.
- McSween H., 1996. *Od gwiazdowego pyłu do planet*. Prószyński i spółka, Warszawa.
- Moskowitz C., 2010. *Japanese Asteroid Probe Makes Historic Return to Earth*. <http://space.com> (13.10.2010).
- Nieć M. (red.), 1994. *Kryteria bilansowości złóż kopalin*, Ministerstwo Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa, pod redakcją M. Niecia, Komisja Zasobów Naturalnych, OIKOS, Warszawa.
- Sears D. W. G., 2004. *The origin of chondrules and chondrites*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Siemiątkowski J., 2001. *Petrography of the Baszkówka chondrite*. *Geological Quarterly*, vol. 45 (3), str. 263–280.
- www.esa.int/SPECIALS/NEO/SEMZRZNVGJE_0.html, 20.10.2010.