

Katarzyna ŁUSZCZEK<sup>1</sup>, Jeremiasz MERKEL<sup>1</sup>

# Zasobność w wybrane surowce metaliczne stref odmieszania planetarnych stopów krzemianowych i metalicznych na podstawie analizy składu chemicznego pallasytów i mezosyderytów

Wealth in selected metallic resources of planetary siliceous and metallic alloys liquation zones on the base of analyze of chemical composition of pallasites and mesosiderites

**Abstract:** Pallasites and mesosiderites belong to stony-iron meteorites and are representative matter of planetary siliceous and metallic alloys liquation zones. Pallasites origin most probably from frontier zones of parent asteroid between iron-nickel alloy core and mantle constituted of olivine, which was destructed during collisions and impacts. Unlike mesosiderites, pallasites parent body was disrupted probably after solidification of its differentiated interior. Asteroids: 201 Penelope, 250 Bettina and 337 Devosa are considered to be parent bodies of mesosiderites, while asteroids: 246 Aspordina, 289 Nenetta and 446 Aeternitas are parent bodies of pallasites. Analysis of chemical composition of mesosiderites and pallasites and their comparison with chemical composition of the Earth's crust allowed the authors to conclude on wealth of metallic resources on their parent bodies.

Both pallasites and mesosiderites and in consequence the liquation zones of siliceous and metallic alloys from which these meteorites origin, have the highest abundances of PGM (Platinum Group of Metals) and Fe, Ni, Co, Cr, Au. Mesosiderites contain from several hundred thousand times to several hundred times more precious metals than the terrestrial crust. The highest enrichment can be observed for: Ru, Os, Pt, Re and Au. Moreover, Ni, Co, Ge and Cr have much higher concentrations in mesosiderites than in the Earth's crust. Pallasites have the highest enrichment in precious metals as well (Ru, Ir, Os, Pt, Pd and Au). The higher concentration of Re, Ni, Co, Ge and Cr in pallasites than in the terrestrial crust was also observed.

The higher abundances of Fe, Ni, Co, Au and Ir in bulk composition of mesosiderites and pallasites than in composition of CI chondrites, HED meteorites and the terrestrial crust give the evidence that crustal material composed of silicates during liquation processes lost most of these elements in favor to metallic alloys. The process of migration of elements and their liquating to metallic alloys was not done completely in the zone, where mesosiderites and pallasites origin, what indicate higher abundances of Fe, Ni and Co in silicates of stony-iron meteorites than in CI chondrites, HED meteorites and terrestrial crust.

**Keywords:** stony-iron meteorites, A-type asteroid, Xk-type asteroid, metallic resources, planetary siliceous and metallic alloys liquation zones

<sup>1</sup> Politechnika Wroclawska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Zakład Geologii i Wód Mineralnych; Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław; e-mail: katarzyna.luszczek@pwr.edu.pl

## Wstęp

Od kilku lat na Wydziale Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej prowadzone są badania mające na celu określenie zasobów surowców metalicznych w Układzie Słonecznym (Łuszczek 2011, 2014; Przylibski i Łuszczek 2012). Przeprowadzone do tej pory analizy dotyczyły występowania tych surowców na ciałach macierzystych następujących meteorytów: chondrytów zwyczajnych (Łuszczek 2012, 2013; Łuszczek i Przylibski 2011, 2013), chondrytów węglistych (Gruchot 2013) i enstatytowych (Cisowski 2013). Wspomniane prace dotyczą planetoid niezdyferencjonowanych, a więc takich, które w swojej przeszłości geologicznej nie przeszły procesu dyferencjacji planetarnej i odmieszania stopów krzemianowych i stopów metalicznych. Opublikowano także rozważania na temat surowców metalicznych na ciałach macierzystych meteorytów żelaznych (Przylibski i in. 2012), stanowiących metaliczne jądra obiektów zdyferencjonowanych, które zostały następnie wyeksponowane w wyniku zderzeń i kolizji. W tej pracy autorzy skupili się natomiast na meteorytach żelazno-kamiennych, mezosyderytach i pallasytach, stanowiących fragmenty materii pochodzącej ze stref odmieszania planetarnych stopów krzemianowych i metalicznych, a więc stref pośrednich między metalicznym jądrem a krzemianową skorupą. Celem artykułu było określenie zasobności w wybrane surowce metaliczne stref odmieszania stopów krzemianowych i metalicznych na podstawie analizy składu chemicznego mezosyderytów i pallasytów.

## Charakterystyka mezosyderytów i pallasytów

Do stycznia 2017 roku rozpoznano 229 mezosyderytów, w tym tylko 7 z nich zostało sklasyfikowanych jako spadki ([www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php](http://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php), 2017). Mezosyderyty są polimiktycznymi brekcjami, złożonymi ze stopu żelazowo-niklowego oraz klastów krzemianowych osadzonych w matriks złożonym z krzemianów i stopu FeNi (Grady i in. 2014). Stop FeNi rozmieszczony jest nierównomiernie w strukturze skały. Metale i siarczki występują w postaci owalnych klastów, o średnicy poniżej 4 cm oraz ziaren w matriks, wraz z żyłkami przecinającymi zarówno klasty jak i matriks. Ziarna metaliczne zawierają 6–10% wag. niklu, w związku z czym na ich wytrawionych powierzchniach można zaobserwować figury Widmanstättena. Kamacyt otacza krzemiany, podczas gdy taenit i tetraetaenit często obecne są w postaci ziaren metalicznych stopu FeNi. Siarczki (głównie troilit, 1–14% wag.) występują pomiędzy częściami matriks ubogimi, a bogatymi w metale. Schreibersyt jest obecny w kamacycie lub w matriks na granicy krzemianów i stopu żelazowo-niklowego. W kamacycie, taenicie, tetrataenicie i troilicie mezosyderytów można zaobserwować zmiany szokowe (Grady i in. 2014).

Pallasyty są jednymi z najrzadziej spotykanych meteorytów. W bazie danych MetBull znajduje się 110 meteorytów sklasyfikowanych jako pallasyty ([www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php](http://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php) 2017). Tylko cztery z nich zostały sklasyfi-

kowane jako spadki co oznacza, że ich lot był obserwowany przez świadków (Przylibski i Piłski 2013). W pallasytach część krzemianowa (zbudowana z oliwinów) znajduje się w uporządkowanej strukturze przypominającej sieć. Węzły tej sieci wypełnione są stopem żelazowo-niklowym, który występuje w postaci faz mineralnych – kamacytu i taenitu. W przekroju poprzecznym wytrawionych powierzchni objawia się to obecnością figur Widmanstättena. Pallasyty zbudowane są głównie z oliwinu i stopu żelazowo-niklowego, występujących w podobnych proporcjach oraz domieszek: troilitu, chromitu, fosforanów wapniowych i schreibersytu (Grady i in. 2014).

Poza grupą główną pallasytów wyróżnia się m.in. grupę pallasytów piroksenowych, w której znaczną część wśród krzemianów stanowią pirokseny (1–35% obj.). Zawartość stopu żelazowo-niklowego w pallasytach jest komplementarna do oliwinów i piroksenów. Główna grupa pallasytów zawiera około 7–13% wag. Ni, co jest zbliżone do zawartości niklu w wysokoniklowych meteorytach żelaznych typu IIIAB. Natomiast grupa PES (ang. *Pallasites Eagle Station*, grupa w skład której wchodzi meteoryty: Eagle Station, Cold Bay i Itzawisis) zawiera około 14–20% wag. Ni, co może wskazywać na pewne pokrewieństwo z meteorytami żelaznymi typu IIE. Zakres zawartości metali w pallasytach piroksenowych pokrywa się z zakresem grupy głównej oraz częściowo z grupą PES. W pallasytach występuje niewielka liczba minerałów akcesorycznych – najczęściej jest to troilit (0,1–15% obj.) i schreibersyt (0,3–2,8% obj.). Chromit tworzy euhedralne (idiomorficzne) ziarna, które uległy rekrytalizacji lub duże asocjacje, w których współwystępuje wraz z oliwinem w postaci kryształów, osiagających nawet 10 cm średnicy (Grady i in. 2014). Stop żelazowo-niklowy występuje głównie w postaci kamacytu. Czysty, pozbawiony domieszek taenit może występować w postaci nieregularnych ziaren. Jest on także wyraźnie widoczny na brzegach ziaren zonalnego tetraetaenitu.

Zarówno mezosyderyty jak i pallasyty należą do meteorytów żelazno-kamiennych. Widoczne różnice w ich składzie chemicznym i mineralnym oraz cechach strukturalno-teksturalnych świadczą o tym, że powstały one w innych momentach ewolucji ich ciał macierzystych.

## Strefy odmieszania planetarnych stopów krzemianowych i metalicznych

Ciała powstające w młodym Układzie Słonecznym były ogrzewane głównie wskutek ciepła powstającego w wyniku rozpadu krótkożyjących izotopów promieniotwórczych, głównie  $^{26}\text{Al}$  i  $^{60}\text{Fe}$  (Miyamoto i in. 1981; Harrison i Grimm 2010; Moskovitz i Gaidos 2011). Pewne ilości ciepła mogły być również wytwarzane podczas kolizji i zderzeń z innymi obiektami (Keil i in. 1997; Davison i in. 2013). Grzanie radioaktywne podnosiło temperaturę i spowodowało całkowite stopienie planet oraz większych planetoid. Po przetopieniu doszło do likwacji (odmieszania) stopów wywołanej różnicą ich gęstości. To właśnie wówczas większość cięższych, syderofilnych pierwiastków uległa dyferencjacji grawitacyjnej i skupiła się wewnątrz planety tworząc metaliczne jądro. Natomiast lżejsze pierwiastki litofilne ulegając odmieszaniu z pierwotnego stopu uległy wyniesieniu ku powierzchni pla-

nety, dając początek materii, z której następnie krystalizowały krzemianowy płaszcz i skorupa. Ciała niebieskie, które przeszły ten proces dyferencjacji planetarnej nazywamy obiektami zdyferencjonowanymi (np. planety skaliste w wewnętrznym Układzie Słonecznym, planetoida 4 Westa). Pomiędzy metalicznym jądrem a krzemianowym płaszczem mamy do czynienia ze strefą przejściową, zbudowaną z obu rodzajów materii. To właśnie z tej strefy pochodzą meteoryty żelazno-kamienne.

Pallasyty to meteoryty, które powstały w wyniku dyferencjacji planetarnej ciała macierzystego po zakończeniu jego akrecji, w jego wnętrzu, w strefie przejściowej między krzemianową skorupą a metalicznym jądrem. Natomiast mezosyderyty tworzyły się podczas kolizji ciała zdyferencjonowanego, którego strefa odmieszania stopu krzemianowego i metalicznego pozostawała płynna, z dostarczaniem materiałem skalnym w postaci klastów, wdzierających się w strefy odmieszania i tworzących brekcje (Pilski 2017 – *personal communication*). Scott i współautorzy (2001) twierdzą, że mezosyderyty powstały wówczas, gdy planetoida o średnicy 200–400 km ze stopionym (płynnym) jądrem zderzyła się z ciałem o średnicy 50–150 km. Pierwotny uśredniony skład stopu metalicznego, który zmieszał się z krzemianami, jest najbardziej podobny do składu meteorytów żelaznych IIIAB, pochodzących z metalicznego jądra planetoidy (Wasson i in. 1974; Hassanzadeh i in. 1990). Dlatego mezosyderyty stanowią połączenie głównie materiału ze skorupy oraz jądra planetoidy zdyferencjonowanej i zawierają tylko podrzędne ilości (jeśli w ogóle) bogatego w oliwiny materiału płaszczu (Wadhwa i in. 2003). Różnice w genezie tych dwóch klas meteorytów żelazno-kamiennych odzwierciedlają ich cechy strukturalne i tekstualne (opisane we wcześniejszym punkcie).

## Ciała macierzyste mezosyderytów i pallasytów

Ciała macierzyste mezosyderytów i pallasytów to planetoidy, które przeszły proces dyferencjacji planetarnej, krążące w pasie głównym planetoid między orbitami Marsa i Jowisza. Niektóre z nich mogą również należeć do Planetoid Bliskich Ziemi (ang. *Near Earth Asteroids*), nazywanych tak ze względu na to, że przecinają one orbitę ziemską lub przechodzą w jej pobliżu (McSween i Huss 2010).

Vernazza i współautorzy (2009) uważają, że widma światła odbitego od powierzchni planetoid: 201 Penelope, 250 Bettina i 337 Devosa (należących do typu spektralnego Xk w taksonomii Bus–DeMeo) są kompatybilne z cechami mezosyderytów. Planetoidy te stanowią więc najprawdopodobniej ciała macierzyste mezosyderytów.

Analizy chemiczne udowodniły, że znane nam pallasyty pochodzą z co najmniej czterech ciał macierzystych (grupa główna pallasytów, pallasyty the Eagle Station (PES), meteoryty Zinder oraz Y-8451). Anormalny skład pallasytów Milton, Springwater oraz Glorieta Mountain zwiększa prawdopodobną liczbę ciał macierzystych do co najmniej siedmiu (Grady i in. 2014). Analizując widma promieniowania (głównie podczerwonego) odbitego od powierzchni planetoid i porównując je z widmami promieniowania odbitego od sproszkowanych próbek meteorytów

ustalono, że ciałami macierzystymi pallasytów mogą być planetoidy typu A, takie jak: 246 Asporina, 289 Nenetta czy 446 Aeternitas. Przybliżony skład chemiczny oliwinów tej ostatniej planetoidy jest podobny do składu oliwinów w pallasytach, natomiast skład planetoidy 246 Asporina już nie, co znacznie zmniejsza prawdopodobieństwo tego by planetoida ta mogła być ciałem macierzystym pallasytów (Grady i in. 2014).

Występowanie planetoid o typach spektralnych odpowiadających meteoritom żelazno-kamiennym świadczy o tym, że w wyniku kolizji i zderzeń krzemianowy płaszcz musiał ulec destrukcji i usunięciu, a strefy odmieszania wyeksponowaniu – stanowią one powierzchnię planetoid, będących ciałami macierzystymi mezosyderytów i pallasytów.

## Źródła danych i metody badań

Źródłem danych wykorzystanych w opracowaniu analizy składu chemicznego pallasytów i mezosyderytów była baza danych MetBase<sup>®</sup>, ver. 7.3 (Koblitz 2010). Została ona zakupiona przez Instytut Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. Dane pozyskane z bazy danych MetBase<sup>®</sup> zostały wyeksportowane do arkusza kalkulacyjnego MS Excel. Uzyskano w ten sposób 6 arkuszy, zawierających dane dotyczące:

- uśrednionego składu chemicznego (*bulk*) mezosyderytów (19 meteorytów),
- składu chemicznego stopu FeNi mezosyderytów (20 meteorytów),
- składu chemicznego części krzemianowej mezosyderytów (23 meteorytów),
- uśrednionego składu chemicznego (*bulk*) pallasytów (31 meteorytów),
- składu chemicznego stopu FeNi pallasytów (52 meteorytów),
- składu chemicznego części krzemianowej pallasytów (31 meteorytów).

Ze względu na stosunkowo małą liczbę danych przeprowadzone przez autorów analizy nie uwzględniały podziału mezosyderytów na poszczególne klasy oraz pallasytów na grupy.

Ponieważ w przypadku większości meteorytów baza danych zawierała kilka wyników analiz jednego meteorytu w pierwszym etapie obróbki danych uśredniono te wyniki dla poszczególnych meteorytów. Następnie w celu lepszego scharakteryzowania zbioru danych (składu chemicznego pallasytów i mezosyderytów) wyznaczono podstawowe parametry statystyczne dla zawartości poszczególnych pierwiastków. Uzyskane w ten sposób wyniki analiz statystycznych posłużyły do sporządzenia tabeli podsumowującej szczegółowe analizy składu chemicznego pallasytów i mezosyderytów. Ze względu na znaczną jej objętość spośród analizowanych metali wybrano te, dla których dane były dostępne w większości z przeprowadzonych analiz i przedstawiono je w tabeli 1.

Pomimo zachowania wszelkich niezbędnych norm i zaleceń związanych z warsztatem stricte matematycznym wydaje się, że uzyskane wyniki należy traktować z pewną dozą ostrożności. Głównym czynnikiem mającym wpływ na taki stan rzeczy jest brak jednolitego sposobu prowadzenia analiz chemicznych. Analizy poszczególnych fragmentów meteorytów – stopu żelazowo-niklowego oraz części krzemianowych skupiają się na określeniu zawartości innych pierwiastków chemi-

cznych – nie są do końca kompatybilne ze sobą. Mimo powyższych zastrzeżeń wydaje się jednak, że wartość merytoryczna uzyskanych wyników jest stosunkowo wysoka i może posłużyć do wyciągania stosownych wniosków odnośnie zasobności w wybrane surowce metaliczne stref odmieszania planetarnych stopów krzemianowych i metalicznych.

## Zawartość wybranych metali w składzie mezosyderytów i pallasytów

Pomimo tego, że zarówno pallasyty jak i mezosyderyty klasyfikowane są jako meteoryty żelazno-kamienne, różnią się one składem chemicznym, co wskazuje na odmienną genezę obu grup meteorytów. W związku z tym rozważania dotyczące zasobności metali przeprowadzono oddzielnie dla każdej z klas meteorytów.

Oczywiste wydaje się stwierdzenie, że mezosyderyty to meteoryty składające się przede wszystkim z żelaza (prawie 24%) i krzemu (prawie 20%) oraz w mniejszej ilości z magnezu (7%), a także glinu i wapnia (po 4%) oraz niklu (3%). Dalsze 0,3% uśrednionego składu chemicznego mezosyderytów stanowi Mn i Cr, następne 0,2% Ti i 0,1% Co. Natomiast pallasyty zbudowane są w 49% z Fe, 12,8% z Mg, 9,3% z Si i 5,7% z Ni. Kolejne 0,2% uśrednionego składu tych meteorytów stanowią Cr oraz Co. Szczegółowych informacji dotyczących zawartości metali w mezosyderytach czy pallasytach dostarczają analizy składu stopu żelazowo-niklowego tych meteorytów (tab. 1).

## Dyskusja uzyskanych wyników

Jako punkt odniesienia do analiz porównawczych wyników uzyskanych dla mezosyderytów i pallasytów przyjęto skład:

- chondrytów CI (reprezentujących najbardziej pierwotną materię Układu Słonecznego, z której w kolejnych etapach ewolucji powstawały ciała zdyferencjonowane),
- meteorytów z grupy HED, pochodzących z planetoidy 4 Westa (stanowiących skorupę ciała zdyferencjonowanego),
- meteorytów żelaznych (tworzących jądro żelazowo-niklowe ciała zdyferencjonowanego; ze szczególnym uwzględnieniem grup IIIAB i IIE – ze względu na ich podobieństwo do stopu FeNi meteorytów żelazno-kamiennych),
- skorupy ziemskiej (jako przykładowej skorupy planety zdyferencjonowanej).

Zaobserwowane zależności w występowaniu metali w omawianych grupach meteorytów wskazują na kierunek migracji pierwiastków podczas procesów dyferencjacji (różnicowania się) materii. Skład pierwotnej materii, z której powstał nasz Układ Słoneczny, reprezentowany przez chondryty CI należy traktować jako punkt startowy w rozważaniach autorów. Następnie wskutek dyferencjacji planetarnej doszło do odmieszania stopów krzemianowych (reprezentowanych przez meteoryty klanu HED) od metalicznych (reprezentowanych przez meteoryty żelazne). W strefie przejściowej między krzemianową skorupą a metalicznym jądrem powstały omawiane przez autorów meteoryty żelazno-kamienne. Wskutek dalszej

**Tabela 1.** Średnia zawartość metali w uśrednionym składzie chemicznym mezosyderytów (bulk), krzemianach i stopie FeNi mezosyderytów, uśrednionym składzie chemicznym pallasytów (bulk), krzemianach i stopie FeNi pallasytów (na podstawie Koblitz 2010) oraz w CI – chondrytach węglistych CI (McSween i Huss 2010), HED – meteorytach klanu HED (średnia obliczona na podstawie danych McSween i Huss 2010), SZ – skorupie ziemskiej (Craig i in. 2003) i ŻEL – meteorytach żelaznych (Przylibski i in. 2012).

|    | mezosyderyty |                |              | pallasyty |                |              | CI      | HED     | SZ        | ŻEL     |
|----|--------------|----------------|--------------|-----------|----------------|--------------|---------|---------|-----------|---------|
|    | bulk         | krze-<br>miany | stop<br>FeNi | bulk      | krze-<br>miany | stop<br>FeNi |         |         |           |         |
|    | [µg/g]       |                |              |           |                |              |         |         |           |         |
| Si | 197 700      | 197 350        |              | 92 400    | 89 240         |              | 106 500 | 236 067 | 282 000   | 903 624 |
| Al | 42 100       | 39 760         |              |           |                |              | 8 500   | 31 257  | 82 300    |         |
| Fe | 243 200      | 234 030        |              | 489 800   | 476 207        |              | 182 800 | 136 767 | 56 000    |         |
| Mg | 72 700       | 72 630         |              | 127 700   | 126 830        |              | 95 870  | 108 233 | 23 000    |         |
| Mn | 3 200        | 3 260          |              |           | 2 357          |              | 1 910   | 4 320   | 950       |         |
| Ti | 2 200        | 2 220          |              |           |                |              | 440     | 1 937   | 5 700     |         |
| Cr | 3 300        | 3 810          | 314,14       | 2 400     | 2 211          | 773,54       | 2 590   | 8 807   | 100       | 83,1    |
| Ni | 29 100       | 17 070         | 86 050       | 56 600    | 52 551         | 106 180      | 1 0640  | 44      | 75        | 92 766  |
| Mo |              |                |              |           | 0,34           | 9,3          | 1,02    |         | 1,5       | 7       |
| Co | 1 300        | 650            | 4 900        | 2 000     | 2 048          | 5 680        | 502     | 16,13   | 25        | 4 846   |
| W  |              |                | 0,99         |           |                | 0,5          | 0,089   | 0,08    | 1,5       | 1,04    |
| Cu |              |                | 171,62       |           |                | 197,8        | 127     |         | 55        | 233     |
| Zn |              |                |              |           | 13,88          |              | 310     | 3,74    | 70        |         |
| Hg |              |                |              |           | 0,31           |              | 0,314   |         | 0,08      |         |
| Au |              | 0,08           | 1,16         |           | 0,005          | 2,38         | 0,314   | 0,0034  | 0,004     | 1,47    |
| Pt |              |                | 8,64         |           |                | 5,41         | 1,004   |         | 0,005     | 7,3     |
| Pd |              |                |              |           |                | 5,61         | 0,588   |         | 0,01      | 5       |
| Ir | 1,9          | 0,27           | 3,52         | 1,16      | 0,021          | 2,29         | 0,47    | 0,0041  | 0,000003  | 3,25    |
| Ru | 0,03         | 0,03           |              | 5,46      |                | 5,46         | 0,692   |         | 0,0000005 | 1,94    |
| Os |              |                | 3,46         |           |                | 6,02         | 0,486   |         | 0,0001    | 5,9     |
| Re |              |                | 0,51         |           |                | 0,46         | 0,037   |         | 0,0004    | 0,38    |
| As |              | 1,25           | 10,35        |           | 0,2            | 21,93        | 1,73    |         | 1,8       | 13,2    |
| Sb |              | 0,05           | 0,19         |           | 0,036          | 0,28         | 0,152   |         | 0,2       | 0,59    |
| Ge |              |                | 48,72        |           |                | 58,43        | 33,2    |         | 1,5       | 199     |
| Ga |              |                | 12,58        |           |                | 21,14        | 9,51    | 0,89    | 15        | 49,9    |
| La |              | 0,76           |              |           |                |              | 0,232   | 0,94    | 50        |         |
| Ce |              | 4,13           |              |           |                |              | 0,621   | 3,95    | 83        |         |
| Nd |              | 2,51           |              |           |                |              | 0,457   | 3,01    | 44        |         |
| Sm |              | 0,45           |              |           |                |              | 0,145   | 0,70    | 7,7       |         |
| Eu |              | 0,34           |              |           |                |              | 0,0546  | 0,20    | 2,2       |         |
| Tb |              | 0,23           |              |           |                |              | 0,0356  | 0,27    | 1         |         |
| Yb |              | 0,76           |              |           |                |              | 0,163   | 0,86    | 3,4       |         |
| Lu |              | 0,12           |              |           |                |              | 0,0237  | 0,13    | 0,8       |         |
| Na | 1 800        | 1 670          |              |           |                |              | 5 010   | 1 445   | 24 000    |         |
| K  | 200          | 140            |              |           |                |              | 530     | 129,67  | 21 000    |         |
| Cs |              |                |              |           | 0,01           |              | 0,185   |         |           |         |
| Mg |              | 72 630         |              |           |                |              | 95 870  | 108 233 | 23 000    |         |
| Ca | 35 400       | 42 560         |              |           |                |              | 9 070   | 27 267  | 41 000    |         |
| Sr |              | 16,29          |              |           |                |              | 7,74    |         |           |         |
| Th |              | 0,32           |              |           |                |              | 0,0309  | 0,29    | 9,6       |         |
| Sc |              | 24,9           |              |           | 2,59           |              | 5,83    | 21,63   |           |         |
| V  |              | 83             |              |           |                |              | 55,7    |         | 135       |         |
| Bi |              | 0,15           |              |           |                |              | 0,11    |         | 0,17      |         |

aktywności geologicznej naszej planety w wyniku szeregu procesów powstała skorupa ziemska, w której to następnie musiało dojść do procesów wzbogacenia materii w metale, by mogły utworzyć się złoża metali, będących przedmiotem eksploatacji.

### Analiza uśrednionego składu chemicznego mezosyderytów

Uśredniony skład chemiczny mezosyderytów jest generalnie bogatszy w metale od uśrednionego składu chondrytów CI. Dotyczy to wszystkich analizowanych pierwiastków z wyjątkiem: Sb (0,79), Mg (0,76), Na (0,35), K (0,32), Ru (0,04) (tab. 2). Mezosyderyty wykazują największe (ponad 10-krotne) wzbogacenie w: Re (13,78), W (11,12), Th (10,36) w stosunku do chondrytów CI oraz znaczne wzbogacenie w: Pt (8,61), Os (7,12), Ce (6,65), Tb (6,46), Eu (6,23), Nd (5,49), Lu (5,06) i Ti (5,02). Zaobserwowane zależności świadczą o tym, że w wyniku procesów dyferencjacji doszło do wzbogacenia materii o pierwotnym składzie chondrytów CI w wymienione metale.

W kolejnym etapie porównywano uśredniony skład chemiczny mezosyderytów z uśrednionym składem chemicznym meteorytów z klanu HED. Mezosyderyty są najbardziej wzbogacone w stosunku do meteorytów z klanu HED w: nikiel (919 razy) i kobalt (126 razy) oraz iryd (463 razy) i złoto (182 razy). Mezosyderyty zawierają także kilkanaście razy więcej wolframu (12 razy więcej) oraz galu (14 razy więcej) niż meteoryty HED. Natomiast zawartość pierwiastków takich jak Mg czy Sm jest w mezosyderytach o 30% mniejsza, a Cr o 70% mniejsza od średniej zawartości tych pierwiastków w meteorytach HED (tab. 2). Pierwiastki, których koncentracje w mezosyderytach są większe niż w meteorytach klanu HED uległy w wyniku dyferencjacji odmieszaniu do stopu FeNi. Natomiast pierwiastki, których zawartość jest mniejsza w mezosyderytach niż w meteorytach HED migrowały do stopów krzemianowych.

Analizowane metale szlachetne występują w mezosyderytach w koncentracjach znacznie większych od ich średniej zawartości w skorupie ziemskiej. Irydu jest w mezosyderytach ponad 630 000 razy więcej, rutenu 60 000 razy więcej, osmu ponad 34 000 razy więcej, platyny 1700 razy więcej, renu 1275 razy więcej, złota 155 razy więcej niż średnio w skorupie naszej planety. Nikiel w mezosyderytach występuje w koncentracjach ponad 530 razy większych, kobalt w ponad 80 razy większych, german ponad 30 razy większych, a chrom ponad 25 razy większych niż w skorupie ziemskiej. Wymienione pierwiastki, których koncentracje są w mezosyderytach większe niż w skorupie ziemskiej uległy podczas procesów związanych z dyferencjacją odmieszaniu do stopów metalicznych. Natomiast średnia zawartość: Si, Al, Ti, V oraz La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Na, K, Th jest w mezosyderytach mniejsza niż średnia zawartość tych pierwiastków w skorupie ziemskiej – świadczy to o odmieszaniu tych pierwiastków do stopów krzemianowych.

Porównując uśredniony skład mezosyderytów z uśrednionym składem meteorytów żelaznych można stwierdzić, że spośród analizowanych metali tylko zawartość



chromu w mezosyderytach jest większa (32 razy) od zawartości Cr w meteorytach żelaznych. Ponadto, mezosyderyty zawierają podobne ilości W, Cu, Pt i Re co meteoryty żelazne. Pozostałe z analizowanych pierwiastków występują w mezosyderytach w koncentracjach mniejszych niż w meteorytach żelaznych (tab. 2). Mniejsza zawartość większości z omawianych metali w mezosyderytach niż w meteorytach żelaznych świadczy o krótszym a w konsekwencji mniej kompleksowym procesie różnicowania się materii, z której zbudowane są mezosyderyty. Dłuższy proces pozwoliłby na lepsze wysortowanie pierwiastków syderofilnych.

### Analiza składu chemicznego stopu FeNi mezosyderytów

Stop FeNi mezosyderytów zawiera prawie 4 razy więcej chromu i 1,34 razy więcej renu w porównaniu ze średnią zawartością tych pierwiastków w meteorytach żelaznych. Pierwiastki takie jak: Ni, Co, W, Cu, Au, Pt, Ir oraz As występują w mezosyderytach w podobnych ilościach, jak w meteorytach żelaznych (tab. 3). Stop FeNi mezosyderytów zawiera natomiast 40% mniej Os, 68% mniej Sb, 76% mniej Ge i 75% mniej Ga niż wynosi średnia zawartość tych pierwiastków w meteorytach żelaznych.

Mezosyderyty zawierają ponad 2 razy więcej Cr i Sb oraz prawie 2 razy więcej As i 1,5 razy więcej Au w porównaniu ze średnim składem meteorytów żelaznych grupy IIIAB. Zawartość większości z analizowanych pierwiastków w stopie FeNi mezosyderytów jest zbliżona do uśrednionego składu stopu meteorytów żelaznych grupy IIIAB. Wyjątek stanowi jedynie Os i Ga, których koncentracja jest odpowiednio o 80% mniejsza i o 37% mniejsza w stopie FeNi mezosyderytów w stosunku do meteorytów żelaznych grupy III AB (tab. 3).

Zawartość chromu w stopie FeNi mezosyderytów jest ponad 6 razy większa niż w uśrednionym składzie meteorytów żelaznych grupy IIE. Zdecydowana większość analizowanych pierwiastków w stopie FeNi mezosyderytów (Ni, Co, W, Cu, Au, Pt, Ir, Re, As) wykazuje zawartości zbliżone do średniej koncentracji tych pierwiastków w meteorytach żelaznych grupy IIE. Jedynie zawartość Ge jest o 30% mniejsza, Os i Sb o 35% mniejsza, a Ga o prawie połowę mniejsza w mezosyderytach od zawartości tych pierwiastków w meteorytach żelaznych grupy IIE (tab. 3).

Przeprowadzone analizy porównawcze wskazują, że pewne ilości chromu, będącego pierwiastkiem litofilnym, nie uległy całkowitemu odmieszaniu i wzbogacają one stop FeNi mezosyderytów w stosunku do średniej zawartości Cr w meteorytach żelaznych czy średniej zawartości dla grup IIIAB i IIE. Zawartość Ni, Co, W, Au, Pt, Re w stopie FeNi mezosyderytów jest zbliżona do zawartości tych pierwiastków w analizowanych grupach meteorytów żelaznych. Koncentracje Os i Ga są mniejsze w stopie FeNi mezosyderytów w porównaniu z ich koncentracjami w stopie FeNi omawianych grup meteorytów żelaznych.

**Tabela 2.** Wzbogacenie/zubożenie w metale uśrednionego składu chemicznego mezosyderytów (MES) w stosunku do: chondrytów CI (MES:CI), meteorytów klanu HED (MES:HED), skorupy ziemskiej (MES:SZ) i meteorytów żelaznych (MES:ŻEL). Pogrubioną czcionką zaznaczono pierwiastki, które w mezosyderytach występują w koncentracjach przynajmniej 1,2 razy większych niż w analizowanej materii ciał odniesienia.

|    | MES:CI       | MES:HED      | MES:SZ         | MES:ŻEL     |
|----|--------------|--------------|----------------|-------------|
| Si | <b>1,85</b>  | 0,84         | 0,70           | 0,22        |
| Al | <b>4,82</b>  | <b>1,31</b>  | 0,50           |             |
| Fe | <b>1,31</b>  | <b>1,74</b>  | <b>4,26</b>    |             |
| Mg | 0,76         | 0,67         | <b>3,16</b>    |             |
| Mn | <b>1,69</b>  | 0,75         | <b>3,40</b>    |             |
| Ti | <b>5,02</b>  | 1,14         | 0,39           |             |
| Cr | 1,04         | 0,30         | <b>27</b>      | <b>32</b>   |
| Ni | <b>3,79</b>  | <b>919</b>   | <b>538</b>     | 0,43        |
| Co | <b>4,06</b>  | <b>126</b>   | <b>82</b>      | 0,42        |
| W  | <b>11,12</b> | <b>12,38</b> |                | 0,95        |
| Cu | <b>1,35</b>  |              | <b>3,12</b>    | 0,74        |
| Au | <b>1,97</b>  | <b>182</b>   | <b>155</b>     | 0,42        |
| Pt | <b>8,61</b>  |              | <b>1 728</b>   | 1,18        |
| Ir | <b>4,04</b>  | <b>463</b>   | <b>633 333</b> | 0,58        |
| Ru | 0,04         |              | <b>60 000</b>  | 0,02        |
| Os | <b>7,12</b>  |              | <b>34 600</b>  | 0,59        |
| Re | <b>13,78</b> |              | <b>1275</b>    | <b>1,34</b> |
| As | <b>3,35</b>  |              | <b>3,22</b>    | 0,44        |
| Sb | 0,79         |              | 0,60           | 0,20        |
| Ge | <b>1,47</b>  |              | <b>32</b>      | 0,24        |
| Ga | <b>1,32</b>  | <b>14,13</b> | 0,84           | 0,25        |
| La | <b>3,28</b>  | 0,81         | 0,02           |             |
| Ce | <b>6,65</b>  | 1,05         | 0,05           |             |
| Nd | <b>5,49</b>  | 0,83         | 0,06           |             |
| Sm | <b>3,10</b>  | 0,64         | 0,06           |             |
| Eu | <b>6,23</b>  | <b>1,70</b>  | 0,15           |             |
| Tb | <b>6,46</b>  | 0,85         | 0,23           |             |
| Yb | <b>4,66</b>  | 0,88         | 0,22           |             |
| Lu | <b>5,06</b>  | 0,92         | 0,15           |             |
| Na | 0,35         | 1,20         | 0,07           |             |
| K  | 0,32         | <b>1,31</b>  | 0,01           |             |
| Ca | <b>4,30</b>  | <b>1,43</b>  | 0,95           |             |
| Th | <b>10,36</b> | 1,10         | 0,03           |             |
| Sc | <b>4,27</b>  | 1,15         |                |             |
| V  | <b>1,49</b>  |              | 0,61           |             |
| Bi | <b>1,36</b>  |              | 0,88           |             |

**Tabela 3.** Wzbogacenie/zubożenie w metale stopu FeNi mezosyderytów (MES FeNi) w stosunku do: uśrednionego składu meteorytów żelaznych (MES FeNi:ŻEL), meteorytów żelaznych IIIAB (MES FeNi:IIIAB) i meteorytów żelaznych IIE (MES FeNi:IIE). Pogrubioną czcionką zaznaczono pierwiastki, które w stopie FeNi mezosyderytów występują w koncentracjach przynajmniej 1,2 razy większych niż w analizowanej materii ciał odniesienia.

|    | MES FeNi:ŻEL | MES FeNi:IIIAB | MES FeNi:IIE |
|----|--------------|----------------|--------------|
| Cr | <b>3,78</b>  | <b>2,10</b>    | <b>6,45</b>  |
| Ni | 0,93         | 1,08           | 1,06         |
| Co | 1,01         | 0,97           | 1,09         |
| W  | 0,95         | 1,10           | 0,83         |
| Cu | 0,74         | 1,05           | 0,77         |
| Au | 0,79         | <b>1,45</b>    | 0,97         |
| Pt | 1,18         | 0,86           | 1,07         |
| Ir | 1,08         | 0,70           | 0,72         |
| Os | 0,59         | 0,20           | 0,64         |
| Re | <b>1,34</b>  | 1,02           | 1,02         |
| As | 0,78         | <b>1,88</b>    | 0,93         |
| Sb | 0,32         | <b>2,38</b>    | 0,63         |
| Ge | 0,24         | 1,19           | 0,71         |
| Ga | 0,25         | 0,63           | 0,52         |

### Analiza składu chemicznego krzemianów mezosyderytów

Większość z analizowanych metali wykazuje wzbogacenie w krzemianach mezosyderytów w porównaniu ze średnim składem chondrytów CI (tab. 4). Krzemiany mezosyderytów zawierają średnio 4 razy więcej Al, Yb, Ca i Sc, 5 razy więcej Ti, Nd i Lu, 6 razy więcej Ce, Eu i Tb oraz 10 razy więcej Th.

Krzemiany mezosyderytów mają generalnie podobną zawartość analizowanych metali do średniej w krzemianach meteorytów z klanu HED. Wyjątek stanowią Ni, którego w krzemianach mezosyderytów jest prawie 390 razy więcej, Ir (66 razy więcej), Co (40 razy więcej) i Au (24 razy więcej) niż w meteorytach należących do klanu HED (tab. 4).

Porównując skład chemiczny krzemianów mezosyderytów ze średnią zawartością metali w skorupie ziemskiej można zaobserwować dwa trendy. Pierwiastki takie jak: Fe, Mg, Mn występują w krzemianach mezosyderytów w koncentracjach 3–4 razy większych, Co i Au ponad 20 razy większych, Cr 38 razy większych, Ni prawie 230 razy większych, Ru 60 000 razy większych, a Ir aż 90 000 razy większych od średniej zawartości tych pierwiastków w skorupie ziemskiej. Z drugiej strony pozostałe z analizowanych metali mają znacznie mniejszą zawartość w krzemianach mezosyderytów niż w skorupie naszej planety (tab. 4).

Krzemiany mezosyderytów charakteryzują się większą zawartością pierwiastków syderofilnych takich jak Fe, Ni, Co niż analizowane grupy meteorytów czy

skorupa ziemska. Także Au i Ir występują w krzemianach mezosyderytów w koncentracjach znacznie większych niż w meteorytach z klanu HED czy skorupie naszej planety. Wskazuje to na odmieszanie się tych pierwiastków podczas procesów dyferencjacji i ich migrację z krzemianowego płaszcza w głębsze strefy ciał zdyferencjonowanych, z których pochodzą mezosyderyty, tj. w kierunku metalicznego jądra.

**Tabela 4.** Wzbogacenie/zubożenie krzemianów mezosyderytów (MES krzem) w metale w stosunku do chondrytów CI (MES krzem:CI), meteorytów z klanu HED (MES krzem:HED) i skorupy ziemskiej (MES krzem:SZ). Pogrubioną czcionką zaznaczono pierwiastki, które w krzemianach mezosyderytów występują w koncentracjach przynajmniej 1,2 razy większych niż w analizowanej materii ciał odniesienia.

|    | MES krzem:CI | MES krzem:HED | MES krzem:SZ  |
|----|--------------|---------------|---------------|
| Si | <b>1,85</b>  | 0,84          | 0,70          |
| Al | <b>4,68</b>  | <b>1,27</b>   | 0,48          |
| Fe | <b>1,28</b>  | <b>1,71</b>   | <b>4,18</b>   |
| Mg | 0,76         | 0,67          | <b>3,16</b>   |
| Mn | <b>1,71</b>  | 0,75          | <b>3,43</b>   |
| Ti | <b>5,05</b>  | 1,15          | 0,39          |
| Cr | <b>1,47</b>  | 0,43          | <b>38</b>     |
| Ni | <b>1,60</b>  | <b>389</b>    | <b>227</b>    |
| Co | <b>1,29</b>  | <b>40</b>     | <b>26</b>     |
| Au | 0,25         | <b>24</b>     | <b>20</b>     |
| Ir | 0,57         | <b>66</b>     | <b>90 000</b> |
| Ru | 0,04         |               | <b>60 000</b> |
| As | 0,72         |               | 0,69          |
| Sb | 0,33         |               | 0,25          |
| La | <b>3,28</b>  | 0,81          | 0,02          |
| Ce | <b>6,65</b>  | 1,05          | 0,05          |
| Nd | <b>5,49</b>  | 0,83          | 0,06          |
| Sm | <b>3,10</b>  | 0,64          | 0,06          |
| Eu | <b>6,23</b>  | <b>1,70</b>   | 0,15          |
| Tb | <b>6,46</b>  | 0,85          | 0,23          |
| Yb | <b>4,66</b>  | 0,88          | 0,22          |
| Lu | <b>5,06</b>  | 0,92          | 0,15          |
| Na | 0,33         | 1,16          | 0,07          |
| K  | 0,26         | 1,08          | 0,01          |
| Ca | <b>4,69</b>  | <b>1,56</b>   | 1,04          |
| Th | <b>10,36</b> | 1,10          | 0,03          |
| Sc | <b>4,27</b>  | 1,15          |               |
| V  | <b>1,49</b>  |               | 0,61          |
| Bi | <b>1,36</b>  |               | 0,88          |

## Analiza uśrednionego składu pallasytów

Porównując uśredniony skład chemiczny pallasytów z uśrednionym składem chemicznym chondrytów węglistych CI można stwierdzić, że zdecydowana większość analizowanych pierwiastków występuje w pallasytach w koncentracjach większych niż w chondrytach CI (tab. 5). Wyjątek stanowi chrom, którego jest o 25% mniej w pallasytach oraz Zn, którego jest o 96% mniej w pallasytach w stosunku do chondrytów CI. Zawartości Si, Mn i Sb są zbliżone w obu omawianych grupach meteorytów. Osm i ren wykazują w pallasytach ponad 12-krotne, a pallad prawie 10-krotne wzbogacenie w stosunku do chondrytów CI.

Średnia zawartość wszystkich analizowanych metali w uśrednionym składzie chemicznym pallasytów jest większa od ich średniej zawartości w meteorytach z klanu HED. Jedynie krzemu, manganu i chromu jest odpowiednio o 62% mniej, o 45% mniej i o 78% mniej w pallasytach w porównaniu z meteorytami HED. Porównując uśredniony skład pallasytów z uśrednionym składem meteorytów HED największe wzbogacenie zaobserwować można dla Ni (ponad 1500 razy), Co (180 razy), Au (350 razy) i Ir (280 razy) (tab. 5).

Zdecydowana większość analizowanych metali występuje w uśrednionym składzie chemicznym pallasytów w koncentracjach większych niż w uśrednionym składzie skorupy ziemskiej. Wyjątek od tej reguły stanowi jedynie krzem, wolfram, cynk i antymon (tab. 5). Pallasyty zawierają średnio znacznie więcej metali szlachetnych niż skorupa naszej planety. Największe wzbogacenie można zaobserwować dla: Ru (10 920 000), Ir (ponad 386 000), Os (60 200), Pt (1082) oraz Pd (561) i Au (prawie 300). Do metali, które występują w pallasytach w koncentracjach znacznie większych niż w skorupie ziemskiej należą także: Re (1 150), Ni (906) i Co (117). Germanu jest w pallasytach prawie 40 razy więcej, a chromu jest 20 razy więcej w stosunku do średniej zawartości tych pierwiastków w skorupie naszej planety (tab. 5).

Pallasyty zawierają średnio 23 razy więcej chromu i prawie 3 razy więcej Ru w porównaniu ze średnią zawartością tych pierwiastków w meteorytach żelaznych. Pallasyty i meteoryty żelazne mają zbliżone średnie koncentracje: Cu, Au, Pd, Pt, Os, Re i As. Uśredniony skład chemiczny pallasytów charakteryzuje się mniejszymi zawartościami pozostałych z analizowanych metali w stosunku do uśrednionego składu meteorytów żelaznych (tab. 5).

Przeprowadzone analizy porównawcze wskazują, że strefy z których pochodzą pallasyty podczas dyferencjacji uległy wzbogaceniu w: Ni, Co, Au, Ir, Ga w stosunku do składu pierwotnej materii (reprezentowanej przez chondryty CI) czy przypowierzchniowych stref ciał zdyferencjonowanych (za jakie uważa się meteoryty z klanu HED czy skorupę ziemską).

## Analiza składu chemicznego stopu FeNi pallasytów

Stop FeNi pallasytów zawiera ponad 9 razy więcej chromu i prawie 3 razy więcej Ru niż średnia zawartość tych pierwiastków w meteorytach żelaznych. Złoto i arsen występują w stopie FeNi pallasytów w koncentracjach około 1,6 razy więk-

**Tabela 5.** Wzbogacenie/zubożenie w metale uśrednionego składu chemicznego pallasytów (PAL) w stosunku do: chondrytów CI (PAL:CI), meteorytów klanu HED (PAL:HED), skorupy ziemskiej (PAL:SZ) i meteorytów żelaznych (PAL:ŻEL). Pogrubioną czcionką zaznaczono pierwiastki, które w pallasytach występują w koncentracjach przynajmniej 1,2 razy większych niż w analizowanej materii ciała odniesienia.

|    | PAL:CI       | PAL:HED     | PAL:SZ            | PAL:ŻEL     |
|----|--------------|-------------|-------------------|-------------|
| Si | 0,85         | 0,38        | 0,32              | 0,10        |
| Fe | <b>2,64</b>  | <b>3,53</b> | <b>8,63</b>       |             |
| Mg | <b>1,33</b>  | 1,18        | <b>5,53</b>       |             |
| Mn | <b>1,23</b>  | 0,55        | <b>2,48</b>       |             |
| Cr | 0,75         | 0,22        | <b>19,46</b>      | <b>23</b>   |
| Ni | <b>6,39</b>  | <b>1549</b> | <b>906</b>        | 0,73        |
| Mo | <b>4,73</b>  |             | <b>3,21</b>       | 0,69        |
| Co | <b>5,84</b>  | <b>182</b>  | <b>117</b>        | 0,61        |
| W  | <b>5,62</b>  | <b>6,25</b> | 0,33              | 0,48        |
| Cu | <b>1,56</b>  |             | <b>3,60</b>       | 0,85        |
| Zn | 0,04         | <b>3,71</b> | 0,20              |             |
| Hg | 0,99         |             | <b>3,88</b>       |             |
| Au | <b>3,80</b>  | <b>351</b>  | <b>298</b>        | 0,81        |
| Pt | <b>5,39</b>  |             | 1082              | 0,74        |
| Pd | <b>9,54</b>  |             | <b>561</b>        | 1,12        |
| Ir | <b>2,47</b>  | <b>283</b>  | 386 667           | 0,36        |
| Ru | <b>7,89</b>  |             | <b>10 920 000</b> | <b>2,81</b> |
| Os | <b>12,39</b> |             | <b>60 200</b>     | 1,02        |
| Re | <b>12,43</b> |             | <b>1150</b>       | <b>1,21</b> |
| As | <b>6,4</b>   |             | <b>6,15</b>       | 0,84        |
| Sb | 1,04         |             | 0,79              | 0,27        |
| Ge | <b>1,76</b>  |             | <b>39</b>         | 0,29        |
| Ga | <b>2,22</b>  | <b>24</b>   | <b>1,41</b>       | 0,42        |

szych, a molibden około 1,3 razy większych niż przeciętnie w meteorytach żelaznych. Zawartości Ni, Co, Cu, Pt, Pd, Os i Re w stopie FeNi pallasytów są porównywalne z zawartościami tych pierwiastków w meteorytach żelaznych. Natomiast zawartość irydu w stopie FeNi pallasytów jest o 30% mniejsza, zawartość wolframu, antymonu i galu o 50% mniejsza, a Ge o 70% mniejsza niż w meteorytach żelaznych (tab. 6).

Stop FeNi pallasytów zawiera większe ilości Cr niż analizowane grupy meteorytów żelaznych. Może to wynikać z faktu, że litofilny chrom nie do końca uległ odmieszananiu ze stopu FeNi pallasytów. Podobnie zawartość Mo, Au, Pd, As jest w stopie FeNi pallasytów większa niż w analizowanych grupach meteorytów żelaznych. Pierwiastki te musiały również wolno migrować ze stopu FeNi podczas procesów dyferencjacji, co w efekcie doprowadziło tylko do częściowego ich odmieszania.

nia. Natomiast mniejsza zawartość Pt i Ir w stopie FeNi pallasytów w porównaniu z analizowanymi grupami meteorytów żelaznych wskazuje na to, że w przypadku tych metali proces odmieszania się zakończył.

**Tabela 6.** Wzbogacenie/zubożenie w metale stopu FeNi pallasytów (PAL FeNi) w stosunku do: uśrednionego składu meteorytów żelaznych (PAL FeNi:ŻEL), meteorytów żelaznych IIIAB (PAL FeNi:IIIAB) i meteorytów żelaznych IIE (PAL FeNi:IIE). Pogrubioną czcionką zaznaczono pierwiastki, które w stopie FeNi pallasytów występują w koncentracjach przynajmniej 1,2 razy większych niż w analizowanej materii ciał odniesienia.

|    | PAL FeNi:ŻEL | PAL FeNi:IIIAB | PAL FeNi:IIE |
|----|--------------|----------------|--------------|
| Cr | <b>9,31</b>  | <b>5,18</b>    | <b>15,88</b> |
| Ni | 1,14         | <b>1,33</b>    | <b>1,30</b>  |
| Mo | <b>1,33</b>  | <b>1,75</b>    | <b>1,66</b>  |
| Co | 1,17         | 1,13           | <b>1,26</b>  |
| W  | 0,48         | 0,56           | 0,42         |
| Cu | 0,85         | <b>1,21</b>    | 0,89         |
| Au | <b>1,62</b>  | <b>2,98</b>    | <b>1,98</b>  |
| Pt | 0,74         | 0,54           | 0,67         |
| Pd | 1,12         | <b>2,34</b>    | <b>1,70</b>  |
| Ir | 0,70         | 0,46           | 0,47         |
| Ru | <b>2,81</b>  | <b>3,41</b>    | <b>2,73</b>  |
| Os | 1,02         | 0,35           | 1,11         |
| Re | <b>1,21</b>  | 0,92           | 0,92         |
| As | <b>1,66</b>  | <b>3,99</b>    | <b>1,98</b>  |
| Sb | 0,47         | <b>3,50</b>    | 0,93         |
| Ge | 0,29         | <b>1,42</b>    | 0,86         |
| Ga | 0,42         | 1,06           | 0,87         |

### Analiza składu chemicznego krzemianów pallasytów

Krzemiany pallasytów zawierają średnio 5 razy więcej Ni, 4 razy więcej Co, 2,6 razy więcej Fe i 1,3 razy więcej Mg niż chondryty CI. Krzem, mangan, chrom i rtęć występują w podobnych ilościach w krzemianach pallasytów oraz w chondrytach CI. Natomiast metale takie jak: Zn, Au, Ir, As, Sb, Cs i Sc w krzemianach pallasytów występują w koncentracjach znacznie mniejszych niż w chondrytach CI (tab. 7).

Krzemiany pallasytów zawierają prawie 1200 razy więcej Ni i 127 razy więcej Co oraz 5 razy więcej Ir, 3,7 razy więcej Zn, 3,5 razy więcej Fe i 1,5 razy więcej Au niż średnia dla meteorytów z klanu HED. Spośród analizowanych pierwiastków jedynie magnez występuje w podobnych ilościach w krzemianach pallasytów i w meteorytach klanu HED. Zawartość manganu, krzemu, chromu i skandiu

w krzemianach pallasytów jest natomiast mniejsza niż średnia w meteorytach HED (tab. 7).

Krzemiany pallasytów zawierają średnio 7000 razy więcej Ir i 700 razy więcej Ni oraz 82 razy więcej Co i 22 razy więcej Cr od średniej zawartości tych pierwiastków w skorupie ziemskiej. Omawiane krzemiany charakteryzują się również większymi koncentracjami Fe (8,5 razy), Mg (5,5 razy), Hg (3,9 razy) i Mn (2,5 razy) w stosunku do średniej koncentracji tych metali w skorupie naszej planety. Zawartość Si, Zn, As i Sb jest w krzemianach pallasytów znacznie mniejsza (od 70 do 90%) od zawartości tych pierwiastków w skorupie ziemskiej (tab. 7).

Większa zawartość syderofilnych pierwiastków, do których należą Fe, Ni i Co, w składzie krzemianów pallasytów w odniesieniu do chondrytów CI, meteorytów klanu HED czy skorupy ziemskiej wskazuje na to, że pierwiastki te podczas procesów dyferencjacji wzbogaciły stopy krzemianowe i na etapie powstania pallasytów nie uległy jeszcze całkowitemu odmieszananiu do stopów metalicznych.

**Tabela 7.** Wzbogacenie/zubożenie krzemianów pallasytów (PAL krzem) w metale w stosunku do: chondrytów CI (PAL krzem:CI), meteorytów z klanu HED (PAL krzem:HED) i skorupy ziemskiej (PAL krzem:SZ). Pogrubioną czcionką zaznaczono pierwiastki, które w krzemianach pallasytów występują w koncentracjach przynajmniej 1,2 razy większych niż w analizowanej materii ciał odniesienia.

|    | PAL krzem:CI | PAL krzem:HED | PAL krzem:SZ |
|----|--------------|---------------|--------------|
| Si | 0,84         | 0,38          | 0,32         |
| Fe | <b>2,61</b>  | <b>3,48</b>   | <b>8,5</b>   |
| Mg | <b>1,32</b>  | 1,17          | <b>5,51</b>  |
| Mn | <b>1,23</b>  | 0,55          | <b>2,48</b>  |
| Cr | 0,85         | 0,25          | <b>22</b>    |
| Ni | <b>4,94</b>  | <b>1197</b>   | <b>700</b>   |
| Co | <b>4,08</b>  | <b>127</b>    | <b>82</b>    |
| Zn | 0,04         | <b>3,71</b>   | 0,20         |
| Hg | 0,99         |               | <b>3,88</b>  |
| Au | 0,02         | <b>1,47</b>   | 1,25         |
| Ir | 0,04         | <b>5,12</b>   | <b>7000</b>  |
| As | 0,12         |               | 0,11         |
| Sb | 0,24         |               | 0,18         |
| Cs | 0,05         |               |              |
| Sc | 0,44         | 0,12          |              |

## Podsumowanie i wnioski

Analizując skład chemiczny pallasytów i mezosyderytów można wyciągnąć wnioski dotyczące zawartości metali w strefach odmieszania stopów krzemianowych i metalicznych ciał Układu Słonecznego.



Meteority żelazno-kamienne różnią się znacząco składem chemicznym od chondrytów CI, co wskazuje, że pallasyty i mezosyderyty musiały przejść proces dyferencjacji planetarnej w obrębie swojego ciała macierzystego. Ponadto analiza porównawcza meteorytów z poszczególnych stref planetoidy zdyferencjonowanej (meteorytów z klanu HED – skorupy, meteorytów żelazno-kamiennych – płaszcz, meteorytów żelaznych – jądra) pozwala wskazać kierunki migracji pierwiastków chemicznych podczas dyferencjacji planetarnej – likwacji przetopionego ciała macierzystego z odmieszaniem stopów krzemianowych i metalicznych.

Zawartość Fe, Ni, Co, Au i Ir w uśrednionym składzie mezosyderytów i pallasytów jest większa od zawartości tych pierwiastków w składzie chondrytów CI, w meteorytach klanu HED czy skorupie naszej planety. Świadczy to o tym, że przypowierzchniowe strefy ciał zdyferencjonowanych zbudowane z materii krzemianowej podczas procesu odmieszania utraciły znaczną część tych pierwiastków, która weszła w skład stopów metalicznych znajdujących się w głębszych strefach ciał zdyferencjonowanych. Większa zawartość Fe, Ni i Co w krzemianach meteorytów żelazno-kamiennych niż w chondrytach CI, meteorytach klanu HED i skorupie ziemskiej wskazuje na to, że proces migracji pierwiastków i ich odmieszania do stopu metalicznego nie zaszedł do końca w strefach z których pochodzą mezosyderyty i pallasyty. Podobnie większa zawartość litofilnego Cr w stopie FeNi mezosyderytów i pallasytów niż w meteorytach żelaznych dowodzi, że nie uległ on całkowitemu odmieszaniu do stopu krzemianowego. Rozważania te dostarczają ważnych informacji o ewolucji materii w Układzie Słonecznym. Są one także istotne z punktu widzenia powstawania złóż metali w przestrzeni kosmicznej, zwłaszcza na ciałach macierzystych meteorytów żelazno-kamiennych.

Najważniejszą grupą surowców metalicznych, wchodzącą w skład zarówno pallasytów jak i mezosyderytów, są platynowce oraz pierwiastki takie jak: żelazo, nikiel, kobalt, chrom i złoto.

Interpretacja uzyskanych wyników analiz statystycznych zasobności stref odmieszania stopów metalicznych i krzemianowych w surowce metaliczne możliwa jest poprzez porównanie koncentracji analizowanych metali w mezosyderytach i pallasytach z ich koncentracją w skorupie ziemskiej. W tym celu wykorzystano opracowane dane dla uśrednionego składu chemicznego tych meteorytów. Zdecydowanie najlepiej w rozważaniach tych wypadają metale szlachetne, których w mezosyderytach jest od kilkuset tysięcy razy do kilkuset razy więcej niż w skorupie ziemskiej. Największe wzbogacenie obserwuje się dla rutenu, osmu, platyny, renu i złota. W dalszej kolejności wymienić należy nikiel (którego w mezosyderytach jest ponad 500 razy więcej niż w skorupie ziemskiej) oraz kobalt, german i chrom (25–80 razy więcej). W przypadku pallasytów największe wzbogacenie obserwuje się także dla metali szlachetnych – Ru, Ir, Os, Pt, Pd i Au. Warto dodać, że rutenu w pallasytach jest ponad 10 milionów razy więcej, a irydu ponad 380 000 razy więcej niż w skorupie naszej planety. Wzbogacenie rzędu tysiąca razy wykazuje ren i nikiel, a kobalt rzędu setek razy. Pallasyty zawierają także 20–40 razy więcej Ge i Cr od średniej zawartości tych pierwiastków w skorupie naszej planety.

Wspomniane ciała macierzyste mezosyderytów (planetoidy: 201 Penelope, 250 Bettina i 337 Devosa) i pallasytów (planetoidy: 246 Asporina, 289 Nenetta czy 446 Aeternitas) stanowią więc nagromadzenia cennych z punktu widzenia rozwoju techniki i technologii surowców metalicznych. Występowanie pierwiastków takich jak Fe, Ni, Co, Cr i platynowce obok siebie na ciałach macierzystych mezosyderytów i pallasytów sprawia, że mamy do czynienia z polimetaliczną materią, która w przyszłości może stać się przedmiotem eksploatacji górniczej. Występowanie wspomnianych metali w skale obok siebie zwiększy zapewne zyski czerpane z wydobycia tych surowców. W pasie planetoid czy wśród Planetoid Bliższych Ziemi znajduje się z pewnością więcej takich ciał, które wciąż czekają na identyfikację.

Rozważania dotyczące surowców metalicznych w przestrzeni kosmicznej choć wydawać się mogą odległe, są potrzebne i z pewnością będą kontynuowane na Wydziale Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej. Ze względu na dynamiczny rozwój fizyki, astronomii, astronautyki i innych nauk pokrewnych, a także coraz to nowe osiągnięcia w zakresie szeroko rozumianych technologii kosmicznych wydaje się, że XXI wiek upłynie pod znakiem podboju i eksploracji kosmosu. Ważną rolę w tej kwestii odkrywają również czynniki geopolityczne, społeczne i ekonomiczne. Powyższą tezę odzwierciedlają m.in. zwiększone nakłady przeznaczone na badania przestrzeni kosmicznej, powstawanie coraz liczniejszych konsorcjów zajmujących się potencjalną eksploatacją złóż pozaziemskich, a także trendy w polityce światowej. Oznacza to, że w chwili obecnej „gra o kosmos” jest nie tylko domeną marzycieli, ale powinna być również przedmiotem zainteresowania wszystkich wielkich osobowości poczynając od naukowców, poprzez potentatów biznesowych, firmy i koncerny górnicze, przemysł metalurgiczny, na politykach i dowódcach największych światowych potęg kończąc.

## Podziękowania

Artykuł powstał w oparciu o pracę inżynierską Jeremiasza Merkla realizowaną na Wydziale Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej pod opieką Katarzyny Łuszczek. Autorzy pragną podziękować Andrzejowi Sylwestrowi Piłskiemu za wskazówki dotyczące ciała macierzystych mezosyderytów i pallasytów, których udzielił podczas powstawania projektu inżynierskiego. Przeprowadzone analizy były możliwe dzięki wsparciu pieniędzmi publicznymi w ramach zlecenia 0401/0125/17 realizowanego w Zakładzie Geologii i Wód Mineralnych na Wydziale Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej.

## Streszczenie

Pallasyty i mezosyderyty, należące do meteorytów żelazno-kamiennych, stanowią materię, która reprezentuje planetarne strefy odmieszania stopów krzemianowych i metalicznych. Pallasyty pochodzą najprawdopodobniej ze strefy granicznej między żelazowo-niklowym jądrem, a oliwinowym płaszczem planetoidy macierzystej, rozbitej w wyniku zderzeń i kolizji. W przeciwieństwie do mezosyderytów, planetoida macierzysta pallasytów została rozbita prawdopodobnie już po zastygnięciu jej zdyferencjonowanego wnętrza. Za ciała macierzyste mezosyderytów uważa się planetoidy: 201 Penelope, 250 Bettina i 337 Devosa, zaś pallasytów planetoidy: 246 Asporina, 289 Nenetta czy 446 Aeternitas. Analiza składu chemicznego mezosyderytów i pallasytów oraz jej porównanie ze

składem skorupy ziemskiej pozwoliła autorom wyciągnąć wnioski dotyczące zasobności w surowce metaliczne ich ciał macierzystych.

Zarówno pallasyty jak i mezosyderyty, a co za tym idzie strefy odmieszania stopów krzemianowych i metalicznych z których pochodzą te meteoryty, są najbardziej zasobne w platynowce oraz Fe, Ni, Co, Cr i Au. Mezosyderyty zawierają od kilkuset tysięcy razy do kilkuset razy więcej metali szlachetnych niż skorupa ziemska. Największe wzbogacenie zaobserwować można dla: Ru, Os, Pt, Re i Au. Także Ni, Co, Ge i Cr występują w mezosyderytach w koncentracjach znacznie większych niż w skorupie ziemskiej. Również pallasyty wykazują największe wzbogacenie w metale szlachetne – Ru, Ir, Os, Pt, Pd i Au. W dalszej kolejności wśród metali występujących w pallasytach w koncentracjach większych niż w skorupie ziemskiej wymienić należy: Re, Ni, Co, Ge i Cr.

Większa zawartość Fe, Ni, Co, Au i Ir w uśrednionym składzie mezosyderytów i pallasytów niż w składzie chondrytów CI, meteorytów z klanu HED czy skorupie ziemskiej świadczy o tym, że przypowierzchniowe strefy ciał zdyferencjonowanych zbudowane z krzemianów podczas procesów odmieszania utraciły znaczną część tych pierwiastków na rzecz stopów metalicznych. Proces migracji pierwiastków i ich odmieszania do stopu metalicznego nie zaszedł prawdopodobnie do końca w strefach, z których pochodzą mezosyderyty i pallasyty na co wskazuje większa zawartość Fe, Ni i Co w krzemianach meteorytów żelazno-kamiennych niż w chondrytach CI, meteorytach klanu HED i skorupie ziemskiej. Także większa zawartość litofilnego Cr w stopie FeNi mezosyderytów i pallasytów niż w meteorytach żelaznych stanowi dowód na to, że nie uległ on całkowitemu odmieszaniu do stopu krzemianowego zgodnie ze swoim geochemicznym charakterem.

## Literatura

- Cisowski M., 2013, *Skład chondrytów enstatytowych jako wskaźnik zasobności ich ciał macierzystych w surowce metaliczne*, Projekt inżynierski, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Politechniki Wrocławskiej (materiały niepublikowane).
- Craig J.R., Vaughan D.J., Skinner B.J., 2003, *Zasoby Ziemi*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Davison T.M., O'Brien D.P., Ciesla F.J., Collins G.S., 2013, *The early impact histories of meteorite parent bodies*, *Meteoritics & Planetary Science*, 48, s. 1894–1918.
- Grady M.M., Pratesi G., Cecchi V.M., 2014, *Atlas of Meteorites*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Gruchot J., 2013, *Skład chondrytów węglistych jako wskaźnik zasobności planetoid typu C w surowce metaliczne*, Projekt inżynierski, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Politechniki Wrocławskiej (materiały niepublikowane).
- Harrison K.P., Grimm R.E., 2010, *Thermal constraints on the early history of the H-chondrite parent body reconsidered*, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, s. 5410–5423.
- Hassanzadeh J., Rubin A.E., Wasson J.T., 1990, *Compositions of large metal nodules in mesosiderites: Links to iron meteorite group IIIAB and the origin of mesosiderite subgroups*, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54, s. 3197–3208.
- Keil K., Stöffler D., Love S.G., Scott E.R.D., 1997, *Constraints on the role of impact heating and melting in asteroids*, *Meteoritics & Planetary Science*, 32, s. 349–363.
- Koblitz J., 2010, MetBase®, ver. 7.3, Meteorite Data Retrieval Software, Ritterhude, Germany.
- Łuszczek K., 2011, *Poszukiwania nowych złóż surowców w Układzie Słonecznym*, [w:] *Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej*, Seria: Studia i Materiały, Górnictwo i Geologia, s. 85–94.
- Łuszczek K., 2012, *Chemical composition of L chondrites group and potential natural resources of their parent bodies*, [w:] J. Drzymała, W. Ciężkowski (red.), *Interdyscyplinarne zagadnienia w górnictwie i geologii*, III, Wrocław, s. 161–173.

- Łuszczek K., 2013, *Chemical composition of Gao Guenie (H5) as a hint for potential metallic resources of parent bodies of H chondrites*, [w:] J. Drzymała, W. Ciężkowski (red.), *Interdyscyplinarne zagadnienia w górnictwie i geologii*, IV, Wrocław, s. 107–118.
- Łuszczek K., 2014, *Potential metallic resources of the asteroid belt*, [w:] *International Forum of students and young researchers Topical Issues of Rational Use of Natural Resources*, Sankt Petersburg 23–25.04.2014, s. 134–136.
- Łuszczek K., Przylibski T.A., 2011, *Skład chondrytów zwyczajnych a potencjalne surowce pasa planetoid*, *Acta Societatis Meteoriticae Polonorum*, 2, s. 91–111.
- Łuszczek K., Przylibski T.A., 2013, *Resources of selected metals in parent bodies of ordinary chondrites*, *Meteoritics & Planetary Science*, 48(7), #5075.
- McSween H.Y., Huss G.R., 2010, *Cosmochemistry*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Miyamoto M., Fuji N., Takeda H., 1981, *Ordinary chondrite parent body: An internal heating model (abstract)*, 12th Lunar and Planetary Science Conference, #1145.
- Moskovitz N., Gaidos E., 2011, *Differentiation of planetesimals and the thermal consequences of melt migration*, *Meteoritics & Planetary Science*, 46, s. 903–918.
- Przylibski T.A., Łuszczek K., 2012, *Mineral resources of extraterrestrial bodies of the Solar System*, *Mineralogia Special Papers*, s. 51–52.
- Przylibski T., Piłski A., 2013, *Wprowadzenie do klasyfikacji, opisu składu i genezy meteorytów*, Raporty Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej 2013, Seria PRE nr 11, 30, s. 1–8 (materiały niepublikowane).
- Przylibski T.A., Donhefner H., Łuszczek K., 2012, *Ciała macierzyste meteorytów żelaznych jako źródła metali*, *Acta Societatis Meteoriticae Polonorum*, 3, s. 71–103.
- Scott E.R.D., Haack H., Love S.G., 2001, *Formation of mesosiderites by fragmentation and reaccreration of a large differentiated asteroid*, *Meteoritics & Planetary Science*, 36, s. 869–881.
- Vernazza P., Brunetto R., Binzel R.P., Perron C., Fulvio D., Strazzulla G., Fulchignoni M., 2009, *Plausible parent bodies for enstatite chondrites and mesosiderites: Implications for Lutetia's fly-by*, *Icarus*, 202, s. 477–486.
- Wadhwa M., Shukolyukov A., Davis A.M., Lugmair G.W., Mittlefehldt D.W., 2003, *Differentiation history of the mesosiderite parent body: Constraints from trace elements and manganese-chromium isotope systematics in Vaca Muerta silicate clasts*, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(24), s. 5047–5069.
- Wasson J. T., Schaudy R., Bild R. W., Chou C.L., 1974, *Mesosiderites – I. Compositions of their metallic portions and possible relationships to other metal-rich meteorite groups*, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38, s. 135–149.

## Strony internetowe

[www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php](http://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php) (dostęp 15.01.2017)