

*surowce pozaziemskie, chondryty zwyczajne,
stop Fe-Ni, platynowce, pas planetoid, zasoby*

Katarzyna ŁUSZCZEK*

POSZUKIWANIA NOWYCH ZASOBÓW SUROWCÓW W UKŁADZIE SŁONECZNYM

W artykule wskazano potencjalne miejsca poszukiwania nowych złóż surowców w Układzie Słonecznym, ze szczególnym uwzględnieniem pasa planetoid. Przedstawiono zalety pasa planetoid oraz źródła informacji o znajdujących się w nim ciałach. Analizowano skład chondrytów zwyczajnych, grupy meteorytów pochodzących z planetoid, w celu określenia zawartości platynowców. Wysoka koncentracja tych metali na poziomie 8–21 ppm odpowiada zawartości platynowców w obecnie eksploatowanych złożach (3,8–22,0 ppm). Przyjmując, że planetoidy zbudowane są ze skał odpowiadających składem chondrytom zwyczajnym, oszacowano potencjalne zasoby platynowców pochodzących z przykładowych planetoid. Obliczono także czas na który wystarczyłyby te zasoby, przy założeniu obecnego zapotrzebowania na metale z grupy platyny.

1. WSTĘP

Jedną z konsekwencji rozwoju naszej cywilizacji jest zwiększone zapotrzebowanie na surowce. Ilość wykorzystywanych przez nas metali wzrasta w niewiarygodnym tempie (Craig 2003). Stajemy więc przed koniecznością poszukiwania nowych złóż surowców (kluczowych dla dalszego rozwoju naszej cywilizacji) na obszarach, na których nie były one dotąd wydobywane.

2. POTENCJALNE MIEJSCA POSZUKIWANIA NOWYCH SUROWCÓW

Nowych surowców możemy szukać na większych głębokościach, niż eksploatowane go tej pory pokłady (udostępnienie przez KGHM złoża Głogów Głęboki–

* Politechnika Wroclawska, Instytut Górnictwa, pl. Teatralny 2, 50-051 Wrocław.

Przemysłowy zalegającego się na głębokości 1100–1400 m) (www.kghm.pl), na obszarach, gdzie do tej pory nie była prowadzona eksploatacja (największe światowe korporacje górnicze otwierają kopalnie w Afryce, Azji, Ameryce Południowej) (www.angloamerican.com, www.bhpbilliton.com, www.riotinto.com). Nowymi terenami, zawierającymi cenne surowce, są obszary odsłonięte w wyniku topienia lodowców i lądolodów (<http://ekologia.pl>) oraz dna mórz i oceanów (Żelaźniewicz i in. 2009).

Kolejnym bardzo atrakcyjnym ze względu na właściwie nieograniczoną liczbę zasobów źródłem surowców jest przestrzeń kosmiczna. Prowadzone są obecnie badania mające na celu określenie i rozpoznanie tkwiących w niej zasobów (Lewis 1997). Ze względu na odległości rozsądne wydaje się poszukiwanie surowców na Księżycu, Marsie i w pasie planetoid. NASA i Lunar Planetary Institute przygotowują obecnie załogową misję która ma dotrzeć na Księżyc przed 2020 r. – jej celem będzie zbadanie srebrnego globu (www.lpi.usra.edu). Regolit księżycowy jest bogaty w izotop helu, będący idealnym paliwem do wykorzystania w reakcji termojądrowej (Fa, Jin 2007). Szacuje się, że 100 kg ^3He , pochodzącego z przetworzenia 20 tys. m³ regolitu księżycowego mogłoby przez rok zasilać 2 mln miasto (nauka.dziennik.pl).

Ciałem niebieskim, które wielu uważa, że należy skolonizować i eksploatować jest Mars. Szczególnie cennym surowcem występującym na Marsie w liczbie 833 na milion atomów wodoru jest deuter (dla porównania na Ziemi występuje on w liczbie 166 atomów na milion atomów wodoru, czyli jest ok. 5 razy rzadszy). Deuter jest paliwem reaktorów termojądrowych a także kluczowym surowcem we współczesnym przemyśle energetycznym (Zubrin, Wagner 1997).

Trwa obecnie misja Dawn, której celem jest zbadanie pasa planetoid i składu niektórych dużych asteroid – Ceres i Westy (www.nasa.gov). W 2010 r. powróciła na Ziemię japońska sonda Hayabusa – była to pierwsza misja, której celem było pobranie i dostarczenie na naszą planetę w celu dalszego badania próbek z powierzchni planetoidy Itokawa (<http://hayabusa.sci.isas.jaxa.jp>). Do 2025 r. USA planuje także wysłanie załogowej misji do pasa planetoid (www.nasa.gov). Jak widać choć obiekty te wydają nam się odległe są jednak w naszym zasięgu.

Wolański przypuszcza, że o złoża surowców pozaziemskich będzie się toczył podobny spór jak obecnie o odsłonięte w wyniku topienia lądolodu tereny na Antarktydzie i w Arktyce (Rybicka 2007).

O tym, że wizja eksploatacji surowców pozaziemskich przestaje być już tylko przesłanką z filmów science-fiction świadczą badania prowadzone w USA, Kanadzie, Japonii. O zaniedbaniu tego typu badań w Europie świadczy fakt, że my zastanawiamy się czy i jakie surowce eksploatować, podczas gdy Amerykanie pracują nad tym jak eksploatować surowce pozaziemskie – a więc nad technologiami wydobywania w warunkach słabej grawitacji oraz nad procesami przeróbki tych surowców (Prado 2009; Zubrin, Wagner 1997; McKay i in 1992; Sonter 1998).

3. PAS PLANETOID DOGODNYM MIEJSCEM POSZUKIWANIA NOWYCH ŹŹÓŻ SUROWCÓW

Pas planetoid, znajdujący się między orbitami Marsa i Jowisza (1,7–4,0 j.a.), zawiera 1000 obiektów o średnicy większej niż 30 km oraz około milion planetoid nie przekraczających swoimi rozmiarami 1 km (Greeley i Baston 1999). Fragmenty planetoid, oddzielone od ciał macierzystych w wyniku zderzeń, docierają do powierzchni naszej planety w postaci meteorytów, co udowodnił w 1854 r. Gregg (Marvin 1996). Większość znajdujących na Ziemi meteorytów pochodzi z pasa planetoid. Badając meteoryty możemy czerpać informacje o składzie ich ciał macierzystych. Uważa się że 95% meteorytów znajdujących na Ziemi to chondryty (Sears 2004). Wszystkie dalsze rozważania będą dotyczyły tej grupy meteorytów. Chondryty zwyczajnie dzieli się na trzy grupy chemiczne. Nazwy tych grup stanowią pierwsze litery angielskich nazw odpowiadających zawartości żelaza w tych meteorytach: H (high-Fe), L (low-Fe), LL (low-Fe, low-metal) (Hutchison 2004).

Pas planetoid znajduje się w centralnej części Układu Słonecznego, w związku z czym zgromadzone w nim zostały wszystkie pierwiastki chemiczne od wodoru do uranu (podczas chłodzenia Układu Słonecznego materiał gęsty miał tendencję do kondensowania bliżej Słońca, podczas gdy lżejszy, bardziej lotny wynoszony był na dalsze odległości) (MsSween 1996). Z górniczego punktu widzenia interesować nas będą głównie pierwiastki wchodzące w skład minerałów rudnych lub będące surowcami energetycznymi. To położenie pasa planetoid sprawia także, że jest on strategicznym miejscem do dalszego poznawania przestrzeni kosmicznej.

Powierzchnie planetoid pokryte są regolitem (Richardson i in. 2005). Jest to duża dogodność w przypadku ewentualnej eksploatacji. Przemieszczanie się regolitu przyczyniło się do segregacji i sortowania materiału. Podczas zderzeń doszło do rozpadu skał na fragmenty, a więc do wstępnego kruszenia potencjalnego urobku (Sears 2004). Leżące w bezładzie fragmenty regolitu charakteryzują się dużą porowatością (Britt, Consolmagno 2001) co znacznie ułatwia dalsze urabianie. Czynniki te sprawiają, że właściwie cofamy się do górnictwa z początków naszej cywilizacji, a ewentualna eksploatacja nie wymaga zaawansowanych maszyn, jak ma to miejsce w warunkach ziemskich. Właściwie wystarczy przesiać pokruszony materiał w celu oddzielenia rudy od skały płonnej. Ze względu na formę występowania surowców na planetoidach można je według ziemskich kategorii zaliczyć do luźnych złóż rozsypiskowych (Łuszczek 2010).

Może się nam wydawać, że pas planetoid leży zbyt daleko. Należy jednak pamiętać, że podobnego argumentu używano, by uzasadnić brak podstaw do zasiedlenia przez Europejczyków Ameryki Północnej i Australii. Do zysków płynących z posiadania kolonii nie trzeba jednak nikogo przekonywać. Za 200 lat obojętność współczesnych rządów wobec wartości ciał niebieskich będzie przez przyszłych historyków oceniana podobnie (Zubrin, Wagner 1997). Odległości, jakie przyjdzie nam pokonać by dotrzeć do planetoid wydają się olbrzymie. Jednak wraz z rozwojem cywilizacji

odległości ulegają zmniejszeniu a wynalezienie odpowiednich środków transportu to tylko kwestia czasu i zaawansowanych badań. Dowodem na to, że pas planetoid znajduje się w naszym zasięgu może być wspomniana już amerykańska misja załogowa planowana na 2025 rok, mająca na celu dokładniejsze poznanie obiektów znajdujących się pomiędzy orbitami Marsa i Jowisza (www.nasa.gov).

Surowce pochodzące z planetoid mają znaczenie nie tylko dla ziemskiej gospodarki. Odegrają one także kluczową rolę w przyszłej eksploracji i kolonizacji kosmosu. Najbardziej cennym surowcem w przestrzeni kosmicznej jest woda. Jest ona kluczowym produktem górnictwa na planetoidach także ze względu na to, że może być ona wykorzystana jako paliwo rakiet powracających na Ziemię. Znaczącą rolę odegrają więc tu planetoidy zawierające minerały uwodnione (tzw. wet asteroids) (Moskowitz 2010a), na których będzie możliwa produkcja paliwa, składającego się z lodu wodnego i glinu (ALICE – od symbolu glinu Al i ang. *ice* – lód) (Hsu 2009).

4. ŹRÓDŁA INFORMACJI O SKŁADZIE CIAŁ NIEBIESKICH

Surowce, których zasoby na Ziemi kończą się lub które występują w małych ilościach, wciąż tkwią w większych nagromadzeniach na planetoidach i innych ciałach niebieskich (Lewis 1997). Fragmenty tych ciał docierają na powierzchnię naszej planety w postaci meteorytów. Szacuje się, że meteoryty znajdujące się w kolekcjach ziemskich pochodzą ze 100–150 ciał macierzystych (Burbine 2003; vide Sears 2004). Szczegółowe badania składu meteorytów dostarczają nam informacji o składzie ciał macierzystych. Dane pochodzące z analiz chemicznych i mineralogicznych meteorytów są zgromadzone w bazie danych MetBase[®], na którą licencję wykupił Instytut Górnictwa PWr.

O składzie ciał macierzystych możemy wnioskować także na podstawie obserwacji pośrednich. Astronomiczne pomiary widma światła obitego przez ciała niebieskie są następnie porównywane z widmami światła słonecznego odbitego od sproszkowanych próbek skał o znanej mineralogii. Kolejnym etapem jest dopasowanie widm meteorytów do widm ciał niebieskich w celu identyfikacji ich ciał macierzystych (McSween 1996). Dopasowanie widma światła odbitego nie jest łatwe i jednoznaczne. Najpopularniejsze grupy meteorytów mają spektra dobrze pasujące do zaledwie kilku planetoid (Sears 2004). Planetoidę 6 Hebe uznaje się za ciało macierzyste chondrytów zwyczajnych grupy H i meteorytów żelaznych grupy IIE (Graffey, Gilbert 1998) a planetoida 433 Eros swoim składem przypomina grupę LL chondrytów zwyczajnych (Sears 2004).

Bezpośrednich informacji o ciałach niebieskich dostarczają nam misje kosmiczne: Galileo, NEAR, Deep Space, Cassini, NEAR Shoemaker, Stardust, Rosetta, Dawn, Don Quijote (Sears 2004; Faure 2004; Moskowitz 2010b; www.esa.int 2009). Wśród nich szczególnie ważna wydaje się japońska misja Hayabusa, która 13.06.2010 r. powróciła na Ziemię z planetoidy Itokawa. Dostarczyła ona pierwsze próbki pobrane z planetoidy (<http://hayabusa.sci.isas.jaxa.jp>).

Wyzwanie przed jakim stoimy to zidentyfikowanie na której planetoidzie występują złoża np. platynowców czy pierwiastków ziem rzadkich i jakie są ich zasoby. Po udokumentowaniu lokalizacji takiego złoża, można wysłać na planetoidę statki kosmiczne, stworzyć tam małą kopalnię łącznie z hutą i na miejscu przerabiać i otrzymywać surowce. Następnie czyste, gotowe do wykorzystania w przemyśle metale byłyby sprowadzane na Ziemię (Sonter 2006).

5. POTENCJALNE SUROWCE POCHODZĄCE Z PASA PLANETOID

Rozpoznanie budowy oraz 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 (Łuszczek, Przylibski 2010).

Wszystkie cywilizacje techniczne bazują na umiejętności wytwarzania metali (Craig 2003). W pasie planetoid surowce umożliwiające uzyskiwanie metali występują w dużych ilościach, większych niż na Ziemi. Potwierdzają to badania prowadzone m. in. przez Lewisa (1997) czy Łuszczek i Przylibskiego (2010). Lewis (1997) oszacował, że planetoida Psyche zawiera $1,7 \times 10^{19}$ kg rudy żelazowo-niklowej, co mogłoby zaspokoić zapotrzebowanie na te metale (przy założeniu zapotrzebowania takiego jak w 2004 r.) na kilka milionów lat. Zgodnie z obliczeniami Lewisa z jednej małej planetoidy mającej średnicę 1 km, ważącej 2 mld t można otrzymać 200 mln t żelaza (co stanowi dwukrotnie więcej niż wydobycie tego metalu z 2004 r.), 30 mln t wysokiej jakości niklu oraz 1,5 mln ton kobaltu.

Przeprowadzone dotychczas przez autorkę badania miały na celu określenie zawartości żelaza, niklu i kobaltu w chondrytach zwyczajnych. Pokazały one, że właściwie 25% chondrytu grupy H (najbardziej obfitej w metale) można uznać za rudę. Grupa L zawiera 21% a grupa LL 11% wyżej wymienionych surowców metalicznych (Łuszczek 2010). Zawartość minerałów rudnych w grupie H na poziomie 25% odpowiada kryterium, przy którym złoża żelaza uważa się za bilansowe (Nieć 1994). Dwie pozostałe grupy chondrytów zwyczajnych mają mniejszą zawartość Fe, niż wartości wskazane w kryteriach bilansowości złóż kopalni. Trzeba jednak wziąć pod uwagę, że kryteria te zostały ustanowione dla warunków ziemskich, gdzie eksploatuje się złoża żelaza do głębokości 500 m. Na planetoidach strefy bogato okruszczone występują na powierzchni lub tuż pod nią, w związku z czym ich koszt wydobycia będzie znacznie mniejszy, niż w przypadku głęboko zalegających złóż ziemskich. Dodatkowo 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 (Łuszczek, Przylibski 2010).

Obok żelaza, niklu i kobaltu za potencjalne surowce występujące na planetoidach uznać można metale grupy platyny (ang. *PGM – Platinum Group Metals*), które są

tam znacznie bardziej powszechne niż na Ziemi (Lewis 1997). W celu określenia zawartości platynowców w poszczególnych grupach chondrytów zwyczajnych zestawiono wyniki analiz chemicznych zawarte w bazie danych MetBase[®] (tabela 1). W zależności od dostępności danych przeanalizowano i uśredniono wyniki dla 18–93 meteoroidów w każdej grupie chondrytów zwyczajnych.

Tabela 1. Porównanie zawartość platynowców w chondrytach zwyczajnych (według MetBase[®]; Koblitz, 2010), skorupie ziemskiej oraz eksploatowanych obecnie złóż platynowców (Jolly, 1980 vide Paulo, Strzelska-Smakowska, 2000)
Table 1. Comparison of PGM content in ordinary chondrites (vide MetBase[®]; Koblitz, 2010), Earth's crust and today's mining PGM deposits (Jolly, 1980 vide Paulo, Strzelska-Smakowska, 2000)

		Pd [ppm]	Pt [ppm]	Pozostałe PGM [ppm]	PGM [ppm]
Chondryty zwyczajne	grupy H	2,517	4,504	6,474	13,495
	grupy L	1,685	1,738	4,295	7,718
	grupy LL	4,575	7,016	9,236	20,827
Skorupa ziemska		0,010	0,005	0,004	0,019
Złóża ziemskie		1,5–8,6	1,8–10,4	0,5–3,0	3,8–22,0

Z przeprowadzonych analiz wynika, że chondryty zwyczajne są znacznie bogatsze w platynowce (nawet 700 razy) niż skorupa ziemska. Nawet najbardziej ubogie w platynowce chondryty z grupy L (zawierające ok. 8 ppm platynowców) posiadają ich więcej niż przeciętnie eksploatowane złoża ziemskie takiej jak Sudbury, Norylsk, Tałnach (3,8 ppm) czy Hartley (4,6 ppm). Najbogatsza w platynowce jest grupa LL (ok. 21 ppm) co odpowiada eksploatowanemu obecnie złożu Stillwater w USA (Jolly 1980; vide Paulo, Strzelska-Smakowska 2000). Jeśli przyjąć, że całe ciała macierzyste chondrytów zwyczajnych zbudowane są ze skał o składzie odpowiadającym analizowanej grupie meteoroidów to wówczas całe planetoidy można traktować jako bogate złoża metali z grupy platyny.

Znając zawartość potencjalnych surowców metalicznych z grupy platyny w ciałach macierzystych chondrytów zwyczajnych oszacowano potencjalne zasoby znajdujące się na przykładowych planetoidach (tabela 2). 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 platynowców odpowiadających chondrytom z grupy H;
- planetoida 433 Eros, uważana za ciało macierzyste chondrytów zwyczajnych grupy LL, jest jednorodnym ciałem zbudowanym z materii chondrytowej o zawartości platynowców odpowiadających chondrytom z grupy LL;
- planetoida 11 Parthenope uważana jest za ciało macierzyste chondrytów bez wskazania, jakiej grupy meteoroidy mogą z niej pochodzić – dlatego obliczeń dokonano dla grup H L i LL, by określić maksymalne i minimalne zasoby su-

rowców; podobnie jak w powyższych przypadkach przyjęto, że cała planetoida jest jednorodnym ciałem zbudowanym z materii odpowiadającej chondrytom pochodzącym z podanych grup.

Tabela 2. Potencjalne zasoby platynowców pochodzących z wybranych planetoid, oszacowane przez autorkę na podstawie składu chemicznego chondrytów zwyczajnych (według MetBase[®]; Koblitz 2010) w odniesieniu do zasobów ziemskich (Smakowski i in. 2009). Masa planetoid według (Baer 2008)
Table 2. Potential PGM resources coming from chosen asteroids, estimated by author on the base of chemical composition of ordinary chondrites (vide MetBase[®]; Koblitz 2010) in comparison to Earth's deposits (Smakowski et al. 2009). Mass of asteroids vide (Baer 2008)

Ciało niebieskie	Grupa	Masa [t]	Zasoby			
			Pd [t]	Pt [t]	Pozostałe PGM [t]	PGM [t]
6 Hebe	H	$1,40 \cdot 10^{16}$	$3,52 \cdot 10^{10}$	$6,31 \cdot 10^{10}$	$9,06 \cdot 10^{10}$	$1,89 \cdot 10^{11}$
433 Eros	LL	$6,69 \cdot 10^{12}$	$3,07 \cdot 10^7$	$4,69 \cdot 10^7$	$6,18 \cdot 10^7$	$1,39 \cdot 10^8$
11 Parthenope	H	$5,13 \cdot 10^{15}$	$1,29 \cdot 10^{10}$	$2,31 \cdot 10^{10}$	$3,32 \cdot 10^{10}$	$6,92 \cdot 10^{10}$
	L		$8,65 \cdot 10^9$	$8,92 \cdot 10^9$	$2,20 \cdot 10^{10}$	$3,96 \cdot 10^{10}$
	LL		$2,35 \cdot 10^{10}$	$3,60 \cdot 10^{10}$	$4,74 \cdot 10^{10}$	$1,07 \cdot 10^{11}$
Złóża ziemskie	–	–	$2,50 \cdot 10^4$	$3,60 \cdot 10^4$	$1,00 \cdot 10^4$	$7,10 \cdot 10^4$

Jak wynika z danych przedstawionych w tabeli 2 zasoby palladu ($3,07 \cdot 10^7$ t) i platyny ($4,69 \cdot 10^7$ t) tkwiące na Erosie, najmniejszej z analizowanych planetoid jednak o najwyższej zawartości platynowców, są ponad tysiąc razy większe niż znane obecnie ziemskie zasoby tych metali (odpowiednio: $2,50 \cdot 10^4$ t i $3,60 \cdot 10^4$ t). Pozostałe planetoidy zawierają ponad milion razy więcej palladu, platyny i pozostałych metali tej grupy niż znane ziemskie złoża.

Znając produkcję platynowców na Ziemi w 2007 r. (Smakowski i in. 2009) obliczono na jak długo potencjalne surowce pochodzące z przykładowych planetoid mogłyby zaspokoić nasze zapotrzebowanie na te metale. Wyniki obliczeń zawarte są w tabeli 3.

Biorąc pod uwagę produkcję platynowców z 2007 r. znane obecnie ziemskie złoża są w stanie zaspokoić nasze potrzeby przez najbliższe sto lat. Należy mieć jednak świadomość, że zapotrzebowanie na te metale stale rośnie (Smakowski i in. 2009). Nowym atrakcyjnym ze względu na swą obfitość źródłem platynowców mogą być planetoidy. Jak widać w zależności od rozmiarów i zawartości poszczególnych metali zasoby tkwiące na jednej planetoidzie wystarczyłyby na najbliższe setki tysięcy (Eros) a nawet setki milionów lat (Hebe i Parthenope).

Jak pokazują przedstawione przykłady planetoidy można uznać za złoża żelaza, niklu i kobaltu. Nie bez znaczenia jest też zawartość innych metali, w tym znaczny udział platynowców. Wysoka ich koncentracja w skałach odpowiadających składem chondrytom

zwyczajnym sprawia, że metale te można traktować w dwojaki sposób. Metale z grupy platyny mogą być uznane za kopalinę towarzyszącą w złożach żelaza, niklu i kobaltu. Wysokie ceny platynowców oraz zwiększone w ostatnich latach zapotrzebowanie na tego typu metale znacznie podnoszą wartość tkwiących na planetoidach potencjalnych złóż surowców metalicznych. Zawartość platynowców na poziomie ok. 8–21 ppm sprawia, że planetoidy można także traktować jako samodzielne złoża tych metali.

Tabela 3. Oszacowany przez autorkę czas na jaki wystarczyłyby zasoby potencjalnych surowców pochodzących z wybranych planetoid oraz znanych złóż ziemskich, przy założeniu produkcji platynowców z 2007 r. (Smakowski i in. 2009)

Table 3. Estimated by author time of potential resources utilization from chosen asteroids and known terrestrial deposits by assumption production of PGM from 2007 (Smakowski i in. 2009)

	Pd	Pt	Pozostałe PGM
Produkcja [t/rok]	216,945	213,103	78,126
6 Hebe [lat]	162 446 681	295 870 142	1 160 131 181
433 Eros [lat]	141 076	220 247	790 914
11 Parthenope [lat]	59 525 105	108 415 273	425 105 211
	39 850 965	41 837 289	282 006 717
	108 179 618	168 889 211	606 485 984
Ziemia [lat]	115	169	128

6. WNIOSKI

Prowadzone obecnie badania mają na celu identyfikację złóż surowców Układu Słonecznego. Surowce te mogą być one użyteczne w przypadku przyszłej eksploracji i kolonizacji kosmosu lub przywiezione na naszą planetę wesprzeć ziemską gospodarkę. Przestrzeń kosmiczna jest bogatym źródłem surowców zarówno energetycznych (izotop ^3He w regolicie Księżyca, deuter na Marsie) jak i metalicznych (Fe, Ni, Co oraz Pd, Pt i pozostałe platynowce).

Dogodnym (ze względu na dużą liczbę docierających do nas próbek w postaci meteorytów) miejscem poszukiwania potencjalnych surowców jest pas planetoid. Analizując skład chondrytów zwyczajnych możemy określić zasoby tkwiące na ich ciałach macierzystych. Przeprowadzone badania pokazują, że metale takie jak Fe, Ni, Co, PGM występują na planetoidach w znacznie wyższych stężeniach niż w skorupie ziemskiej. Zawartość minerałów rudnych żelaza, niklu i kobaltu waha się od 11% dla najbardziej ubogiej w metale grupy LL do 25% dla najbardziej bogatej w metale grupy H. Wartość odpowiadające grupie H są zgodne z ziemskimi kryteriami bilansowymi złóż dla żelaza.

Platynowce występują w chondrytach zwyczajnych na poziomie 8–21 ppm, czyli w stężeniu ok. 700 razy większym niż w skorupie ziemskiej. Zawartość tych metali w skałach odpowiadających swym składem chondrytom zwyczajnym jest wystarcza-

jąca, by uznać je zgodnie z ziemskimi kryteriami za bogate złoża metali grupy platyny. Oszacowane zasoby tych złóż dla przykładowych planetoid są ponad tysiąc razy większe (w przypadku Erosa) lub nawet milion razy większe (w przypadku Hebe czy Parthenope) od znanych obecnie złóż ziemskich. Tak bogate złoża wystarczyłyby na zaspokojenie naszych potrzeb na kolejne setki tysięcy (Eros) a nawet setki milionów lat (Hebe czy Parthenope).

Powyższe rozważania dotyczą trzech wybranych planetoid. Należy jednak pamiętać, że pas planetoid zawiera tysiące podobnych ciał oraz miliony mniejszych. Jeśli wziąć pod uwagę obecne wykorzystanie tych metali zasoby tkwiące w tej części Układu Słonecznego są właściwie niewyczerpane. Dopóki jednak nie dysponujemy odpowiednimi technologiami eksploatacji tych zasobów, wiedza o nich nie jest jednoznaczna z posiadaniem przydatnych materiałów. Dobrze jest jednak mieć świadomość istnienia tak bogatych złóż. Zaawansowane badania sprawiają, że perspektywa eksploatacji surowców pozaziemskich jest zapewne bliższa niż nam się to wydaje.

LITERATURA

- BAER J., 2008, *Recent Asteroid Mass Determinations*, <http://home.earthlink.net/~jimbaer1/astmass.txt> (15.06.2010).
- BRITT D.T., CONSOLMAGNO G.J., 2001, *Modeling the Structure of High Porosity Asteroids*, *Icarus* vol. 152, s. 134–139.
- CRAIG J.R., VAUGHAN D.J., SKINNER B.J., 2003, *Zasoby Ziemi*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- FA W., JIN Y., 2007, *Quantitative estimation of helium-3 spatial distribution in the lunar regolith layer*, *Icarus*, vol. 190, s. 15–23.
- FAURE G., 2004, *Description of the system of asteroids as of May 20*, 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 II E iron meteorites*, *Meteoritics and Planetary Science*, 33, s. 1281–1295.
- GREELEY R., BASTON R., 1999, *Atlas Układu Słonecznego NASA*, Prószyński i spółka, Warszawa.
- HUTCHISON R., 2004, *Meteorites a petrologic, chemical and isotopic synthesis*, Cambridge University Press, New York.
- HSU J., 2009, *New Rocket Fuel Mixes Ice and Metal*, <http://space.com> (5.05.2010).
- KOBLITZ J., 2010, *MetBase[®] 7.3 Meteorite Data Retrieval Software*, Ritterhude, Germany.
- MARVIN U.B., 1996, *Ernst Florens Chladni (1756-1827) and the origins of modern meteorite research*, *Meteoritics and Planetary Science*, 31, s. 545–588.
- MCKAY M.F., MCKAY D.S., DUKE M.B., 1992, *Space resources*, U.S. Government Printing Office, Washington.
- MCSWEEN H.Y., 1996, *Od gwiazdowego pyłu do planet*, Prószyński i spółka, Warszawa.
- MOSKOWITZ C., 2010a, *'Wet' Asteroid Could Be a Space Gas Station*, <http://space.com> (10.05.2010).
- MOSKOWITZ C., 2010b, *Japanese Asteroid Probe Makes Historic Return to Earth*, <http://space.com> (13.06.2010).
- NIEĆ M. (red.), 1994, *Kryteria bilansowości złóż kopalin*, Ministerstwo Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa, pod red. M. Niecia, Komisja Zasobów Naturalnych, OIKOS, Warszawa.
- LEWIS J.S., 1997, *Mining the Sky: Intold Riches from the Asteroids, Comets, and Planets*, Perseus Publishing, USA.
- ŁUSZCZEK K., 2010, *Skład chondrytów zwyczajnych a potencjalne surowce pasa planetoid*, praca magisterska, Archiwum Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Politechnika Wroclawska.

- ŁUSZCZEK K., PRZYLIBSKI T.A., 2010, *Skład chondrytów zwyczajnych a potencjalne surowce pasa planetoid*, Acta Societatis Meteoriticae Polonorum, Rocznik PTM, vol. 2.
- PAULO A., STRZELSKA-SMAKOWSKA B., 2000, *Rudy metali nieżelaznych i szlachetnych*, AGH, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków.
- PRADO M., 2009, *Mining and Processing an Asteroid*, Permanent, rozdział 1.6. (www.permanent.com/a-mining.htm).
- RICHARDSON J.E., MELOSH H.J., GREENBERG R.J., O'BRIEN D.P., 2005, *The global effects of impact-induced seismic shaking on fractured asteroid surface morphology*, Icarus, vol. 179, s. 325–349.
- RYBICKA U., 2007, *50 lat temu rozpoczęła się era kosmiczna – wywiad z Wolańskim*, www.eduskrypt.pl (16.01.2010).
- SEARS D.W.G., 2004. *The origin of chondrules and chondrites*, Cambridge University Press, Cambridge.
- SMAKOWSKI T., NEY R., GALOS K. (red.), 2009, *Bilans gospodarki surowcami mineralnymi Polski i świata 2007*, Ministerstwo Środowiska, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, Pracownia Polityki Surowcowej, Kraków.
- SONTER M.J., 1998, *The technical and economic feasibility of mining the Near-Earth Asteroids*, 49 IAF Congress, 28.09–2.10.1998, Melbourne, Australia.
- SONTER M.J., 2006, *Asteroid Mining: Key to Space Economy*, <http://space.com> (10.05.2010).
- <http://hayabusa.sci.isas.jaxa.jp> (15.06.2010).
- <http://nauka.dziennik.pl> – *Źródło energii poszukamy na Księżycu* (9.06.2009).
- <http://ekologia.pl> – *Ocieplenie odsłania surowce* (29.01.2011).
- www.angloamerican.com (29.01.2011).
- www.bhpbilliton.com (29.01.2011).
- www.esa.int (29.11.2009).
- www.kghm.pl (2.02.2011).
- www.lpi.usra.edu (3.01.2011).
- www.nasa.gov (18.12.2009).
- www.riotinto.com (29.01.2011).
- ZUBRIN R., WAGNER R., 1997, *Czas Marsa*, Prószyński i S-ka, Warszawa.
- ŻELAŻNIEWICZ A., NEY R., PIETRZYK-SOKULSKA E., TRAMMER J., 2009, *Ziemia życie – zdrowie – surowce*, Polska Akademia Nauk, Warszawa.

PROSPECTING OF NEW NATURAL RESOURCES IN THE SOLAR SYSTEM

In this article, the prospective places of finding new natural resources in the Solar System are shown with great stress placed on the asteroid belt. The advantages of and the sources of information about asteroids are described. Based on the composition of ordinary chondrites, groups of meteorites originated from asteroids, the Platinum Group Metal content is determined. High concentration of these metals (8–21 ppm) corresponds with the PGM content in today's mining deposits (3.8–22.0 ppm). Assuming that asteroids are parent bodies of ordinary chondrites and both have the same chemical composition, the possible resources from asteroids are estimated. Knowing today's demand for PGM, the time of utilization of these reserves is calculated.