

PRZEGLĄD GÓRNICZY

założono 01.10.1903 r.

MIESIĘCZNIK STOWARZYSZENIA INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW GÓRNICTWA

Nr 10 (1138)

październik 2017

Tom 73 (LXXIII)

Perspektywy eksploatacji złóż metali z grupy platynowców z powierzchni asteroid Prospects for the exploitation of platinum group metals (PGM) from the asteroid surface



Inż. Paweł Klóska*)



Mgr inż. Krzysztof Barański*)

Treść: Nieustannie rosnące zapotrzebowanie na surowce metaliczne, w tym metale z grupy platynowców, skłania do poszukiwania nowych, dotychczas niewykorzystywanych źródeł surowców. Potencjalne źródło platynowców stanowią asteroidy znajdujące się w Pasie Planetoid oraz asteroidy z grupy obiektów bliskich ziemi (NEO - ang. *Near-Earth Objects*). Na podstawie prowadzonych obecnie badań i projektów w dziedzinie eksploracji kosmosu, agencje rządowe i przedsiębiorstwa prywatne opracowują technologie umożliwiające eksploatację złóż platynowców pochodzących z powierzchni asteroid. Biorąc pod uwagę wysokie ceny metali z grupy platynowców oraz ich ograniczone zasoby na Ziemi, pomysł eksploatacji złóż pochodzenia kosmicznego wydaje się uzasadniony ekonomicznie. Istotną kwestią są także aspekty prawne i etyczne, związane z wykorzystywaniem obiektów pozaziemskich w celach gospodarczych.

Abstract: Constantly growing demand for metallic minerals, including platinum group metals (PGM) stimulates the search for new sources of raw materials, not used yet. The potential sources of PGM are asteroids located in the Asteroid Belt and asteroids from the group of Near-Earth Objects (NEO). On the basis of ongoing researches and projects in the field of space exploration, government agencies and private companies are working on technologies which enable exploitation of PGM from the surface of asteroids. Because of high prices of PGM minerals and their limited resources on Earth, the idea of exploitation of extraterrestrial sources appears to be economically reasonable. Also, the important issue is legal and ethical aspects connected with the use of extraterrestrial objects for economic purposes.

Słowa kluczowe:

górnictwo kosmosu, pas asteroid, złoża platynowców

Keywords:

space mining, asteroid belt, platinum group metals (PGM) deposits

1. Zasoby geologiczne i wielkość wydobycia platynowców na Ziemi

Metale z grupy platynowców stanowią grupę jednych z najrzadziej występujących w skorupie ziemskiej pierwiastków. Do grupy tej zalicza się sześć pierwiastków 8, 9 i 10 grupy układu okresowego: platynę, pallad, iryd, rod, ruten oraz osm. Platynowce są metalami szczególnie cennymi, ze

względem na szereg właściwości fizycznych, dzięki którym znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach technologii. Metale te wykorzystywane są m.in. przy produkcji katalizatorów samochodowych, dysków twardych, układów elektronicznych, ogniów paliwowych czy aparatury medycznej. Platyna, jest również metalem szlachetnym o istotnym znaczeniu w jubilerstwie. Ze względu na dynamiczny rozwój technologiczny naszej cywilizacji można spodziewać się, że w przyszłości zapotrzebowanie na platynowce będzie coraz większe. W najbliższych latach przewiduje się wzrost popytu na platynowce, przede wszystkim ze względu na wprowadzanie coraz bardziej rygorystycznych norm emisji spalin,

*) Akademia Górniczo Hutnicza w Krakowie

a co za tym idzie konieczność produkcji nowocześniejszych katalizatorów pozwalających na ograniczenie emisji szkodliwych substancji w spalinach (U. S. Geological Survey, 2017). W roku 2014 światowe zapotrzebowanie na platynę wynosiło ok. 145 Mg i wzrastało przez kolejne lata, osiągnęło w 2016 r. ok. 246 Mg (Matthey 2016). Głównym źródłem pozyskiwania platynowców jest produkcja górnicza. W 2016 r. wyniosła ona 172 Mg dla platyny i 208 Mg dla palladu, z czego ok. 70% produkcji miało miejsce w Afryce Południowej. Oprócz tego znaczne ilości platyny, palladu i rodum otrzymuje się w procesach recyklingu. W 2016 r. na całym świecie uzyskano w ten sposób 125 Mg metali (U. S. Geological Survey, 2017).

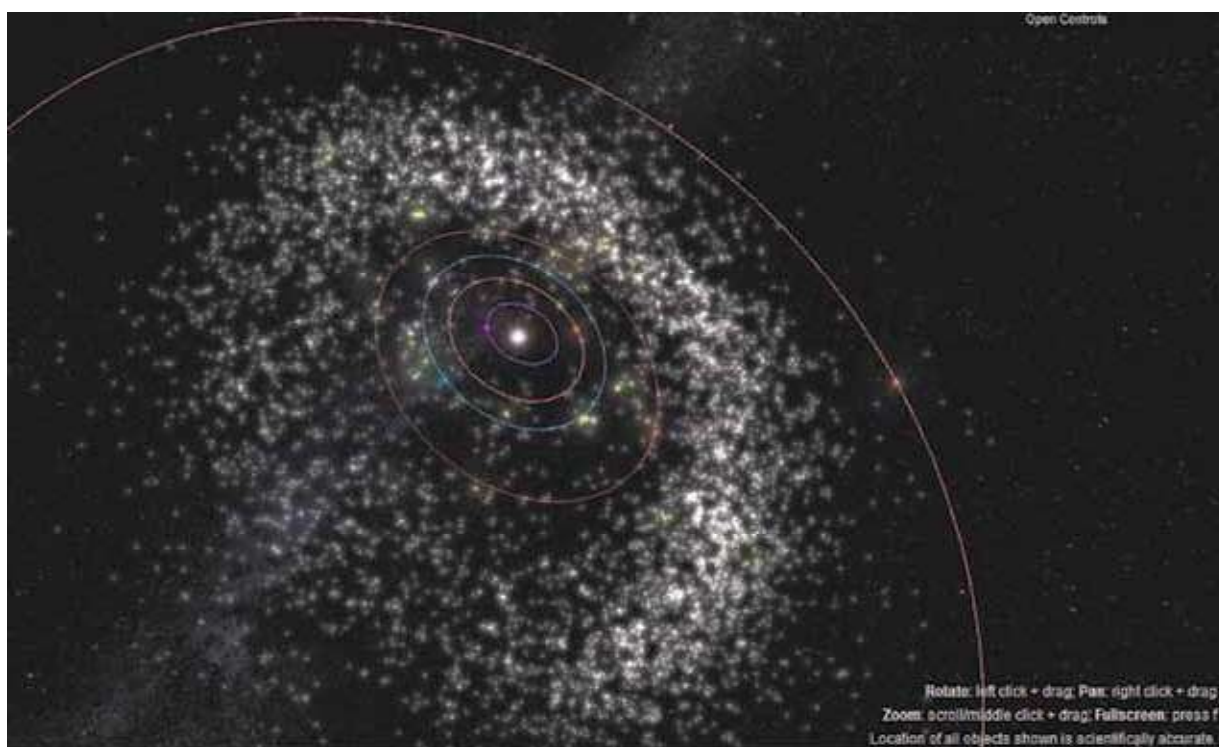
Platynowce są metalami występującymi w skorupie ziemskiej w bardzo małych ilościach. We wczesnym stadium formowania się Ziemi platynowce pod wpływem grawitacji zostawały przyciągane w kierunku jądra planety. Dlatego złoża platynowców można znaleźć przede wszystkim w miejscach erupcji wulkanicznych. Innym źródłem tych metali są asteroidy uderzające o powierzchnię Ziemi. Specyficzne pochodzenie platynowców sprawia, że ich zasoby geologiczne są niewielkie. Na podstawie danych z 2016 r. szacuje się, że światowe zasoby złóż platynowców wynoszą ok. 67 tys. Mg, z czego większość znajduje się w Afryce Południowej (63 tys. Mg), reszta w Zimbabwie (1,2 tys. Mg), Rosji (1,1 tys. Mg) oraz Stanach Zjednoczonych (0,9 tys. Mg) (U. S. Geological Survey, 2017). Zakładając, że wydobycie platynowców będzie utrzymywać się na obecnym poziomie – ok. 400 Mg rocznie, zasoby ziemskie powinny wystarczyć na ok. 150 lat. Jednakże, biorąc pod uwagę prawdopodobne zwiększenie popytu na te metale w przyszłości, może okazać się, że ziemskie zasoby nie pokryją zapotrzebowania na platynowce (Blair 2000). Dlatego uzasadnione wydaje się poszukiwanie źródeł platynowców poza Ziemią.

2. Badanie składu chemicznego asteroid Układu Słonecznego

Obecnie wiadomo o istnieniu ponad 720 tys. asteroid w Układzie Słonecznym, z czego większość znajduje się w Pasie Planetoid, między orbitą Marsa i Jowisza, ok. 420 mln km od Słońca. Skład asteroid ustala się przede wszystkim na podstawie spektroskopii astronomicznej. Metoda ta polega na porównywaniu widma odbitego przez asteroidę, a następnie porównaniu go do widma światła słonecznego odbitego od sproszkowanej próbki skalnej, której skład mineralny jest znany (Łuszczek, Przylibski 2011). Niestety, ustalanie składu ciał niebieskich z wykorzystaniem spektrografii wiąże się z pewną niedokładnością, a wyniki mogą okazywać się niejednoznaczne. Niemniej metoda ta jest obecnie najczęściej używanym sposobem określania składu ciał niebieskich. Dodatkowych informacji o budowie tych ciał niebieskich dostarczyły bezzałogowe misje kosmiczne, takie jak Program Voyager (Źródło internetowe 1).

W zależności od widma światła odbijanego od powierzchni, asteroidy klasyfikuje się do typów spektralnych (Tholen 1989). Większość obserwowanych asteroid zalicza się do jednego z trzech typów: C - węglowe (ang. *carbonaceous*), S - krzemianowe (ang. *silicaceous*) oraz M - metaliczne (ang. *metallic*). Nazwy typów pochodzą od pierwiastków będących głównym budulcem asteroidy. W zależności od typu asteroidy, należy spodziewać się występowania na niej innych składników, których wydobycie może okazać się uzasadnione. Biorąc pod uwagę występowanie platynowców, należy zwracać uwagę przede wszystkim na asteroidy z grupy M, które składają się głównie z niklu, żelaza, a oprócz tego mogą zawierać kobalt, platynowce i złoto (Hellgren 2016).

Ważnym źródłem wiedzy o składzie asteroid jest materiał pochodzący z meteorytów, które rozbiły się o powierzchnię Ziemi. W większości wypadków meteoryty znajdowane na Ziemi klasyfikuje się do grupy chondrytów. Ze względu na



Rys. 1. Poznane asteroidy Układu Słonecznego. Asterank.com (Źródło internetowe 14)

Fig. 1. Discovered asteroids of the Solar System. Asterank.com (Web source 14)

zawartość żelaza, chondryty zwyczajnie podzielić można na trzy grupy: H - ang. *high-Fe*, L - ang. *low-Fe*, LL - ang. *low-Fe, low-metal*. Badania pokazują, że chondryty, oprócz żelaza, niklu i kobaltu zawierają metale z grupy platynowców, w ilościach znacznie przewyższających zawartości platynowców w skorupie ziemskiej. Zakładając, że skład asteroid pochodzących z Pasa Planetoid jest w przybliżeniu taki, jak skład analizowanych na Ziemi chondrytów, ilości platynowców z jednej nawet asteroidy są o rzędy wielkości większe niż całe ziemskie złoża (Łuszczek 2011).

3. Obecne badania i postępy nad wdrożeniem górnictwa kosmicznego

Aby rozważać możliwości pozyskiwania surowców z asteroid, kluczową rolę odgrywa odpowiednie rozpoznanie budowy geologicznej obiektu oraz fizyki jego ruchu w przestrzeni kosmicznej. Od ponad 20 lat agencje kosmiczne różnych krajów, na czele z NASA przeprowadziły kilkanaście misji mających na celu badanie asteroid. Pierwszą sondą, która zbliżyła się do planetoid była sonda *Galileo* wystrzelona przez NASA w 1989 r. (Źródło internetowe 2). Pierwsze lądowanie na powierzchni asteroidy miało miejsce w 2001 r., kiedy sonda *NEAR Shoemaker* dokonała kontrolowanego lądowania na asteroidzie Eros (Źródło internetowe 3). W 2010 r. dzięki japońskiej misji *Hayabusa* udało się dostarczyć na Ziemię próbki pobrane z planetoidy Itokawa (Źródło internetowe 4). Wkład w badanie planetoid dołożyła także Europejska Agencja Kosmiczna, dokonując pierwszego w historii lądowania na kometcie. W 2014 r. lądownik *Philae* w ramach misji *Rosetta* wylądował na powierzchni komety 67P/Czuriumow-Gierasimienko (Źródło internetowe 5).

Obecnie prowadzonych jest kilka misji mających na celu badanie asteroid, spośród których na szczególną uwagę zasługuje misja *OSIRIS-REx* (ang. *Origins Spectral Interpretation Resource Identification Security Regolith Explorer*), prowadzona przez NASA. Rozpoczęta we

wrześniu 2016 r. misja ma na celu wykonanie serii pomiarów oraz pobranie próbek z asteroidy Bennu, należącej do grupy NEO, będących ciałami niebieskimi, których fragmenty orbit znajdują się w odległości nie większej niż 1/3 odległości Ziemi od Słońca. Sonda ma dotrzeć do Bennu w 2018 r., wykonać badania i pobrać materiał z asteroidy, a następnie dostarczyć go na Ziemię w roku 2023 (Źródło internetowe 9). Analiza materiału pobranego *in situ* z powierzchni asteroidy pozwoli na porównanie uzyskanych danych do wyników analizy spektroskopowej, a co za tym idzie weryfikacji obecnego stanu wiedzy o składzie asteroidy.

Innym istotnym przedsięwzięciem NASA jest misja *ARM* (ang. *Asteroid Redirect Mission*) planowana na 2021 r.. Operacja ma na celu pozyskanie próbki w formie pojedynczego głazu o średnicy ok. 4 metrów z powierzchni asteroidy grupy NEO, a następnie przetransportowanie go bezzałogowym pojazdem kosmicznym w pobliże Księżyca, gdzie głaz zostanie wprowadzony na stabilną orbitę okołoksiężycową. Następnie przeprowadzone zostaną dalsze badania nad fragmentem asteroidy (Źródło internetowe 10).

Chociaż pozyskiwanie surowców spoza Ziemi wydaje się być odległą perspektywą, to już teraz działają firmy, których obiektem zainteresowania są możliwości eksploatacji surowców z asteroid. Należy wymienić tutaj przede wszystkim dwie firmy ze Stanów Zjednoczonych. Pierwszą z nich jest Deep Space Industries (DSI). Założone w 2013 r. przedsiębiorstwo ma na celu przygotowywanie infrastruktury pozwalającej na rozpoznawanie, eksploatację oraz przeróbkę surowców pochodzących z asteroid. Obecnie DSI pracuje nad projektami serii bezzałogowych pojazdów kosmicznych, które będą wypełniały wspomniane wcześniej zadania. Niewielkich rozmiarów sondy, jak np. *Prospector-1* pozwolą na wykonanie szczegółowych badań i wykrycie na asteroidzie wody, metali i innych cennych surowców. Inne pomysły DSI to m.in. ważąca 25 kg sonda *FireFly*, pozwalająca na pobranie próbek asteroidy, czy większy pojazd *DragonFly*, umożliwiający transport do 150 kg materiału z asteroidy na Ziemię (Źródło internetowe 11). Drugą firmą pracującą nad eksploatacją asteroid jest Planetary



Rys. 2. Konceptyjne przedstawienie pozyskiwania próbek podczas misji ARM (Źródło internetowe 15)
Fig. 2. Conceptual representation of rock sampling during ARM missions (Web source 15)

Resources, powstałe w 2010 r. (jako Arkyd Astronautics). Firma pracuje nad serią bezałogowych pojazdów *Arkyd* pozwalających na obserwację, badanie i pobranie próbek asteroidy. W 2015 r. Planetary Resources umieściło na orbicie sondę *Arkyd 3*, co pozwoliło na przetestowanie wykorzystywanych przez firmę technologii w przestrzeni kosmicznej. Na etapie projektowania pozostają kolejne pojazdy serii *Arkyd*, takie jak *Arkyd 100: Observer* pozwalający na zdalne zbieranie danych o asteroidach, *Arkyd 200: Interceptor* umożliwiający wykonanie dokładnych badań obiektów z grupy NEO czy *Arkyd 300: Prospector* dostarczający szczegółowych danych o kształcie, rotacji i składzie mineralnym asteroidy ([Źródło internetowe 12](#)). Oprócz wymienionych wcześniej firm, zainteresowanie eksploatacją asteroid wykazują inni przedsiębiorcy, jak np. Bigelow Aerospace czy Kepler Energy.

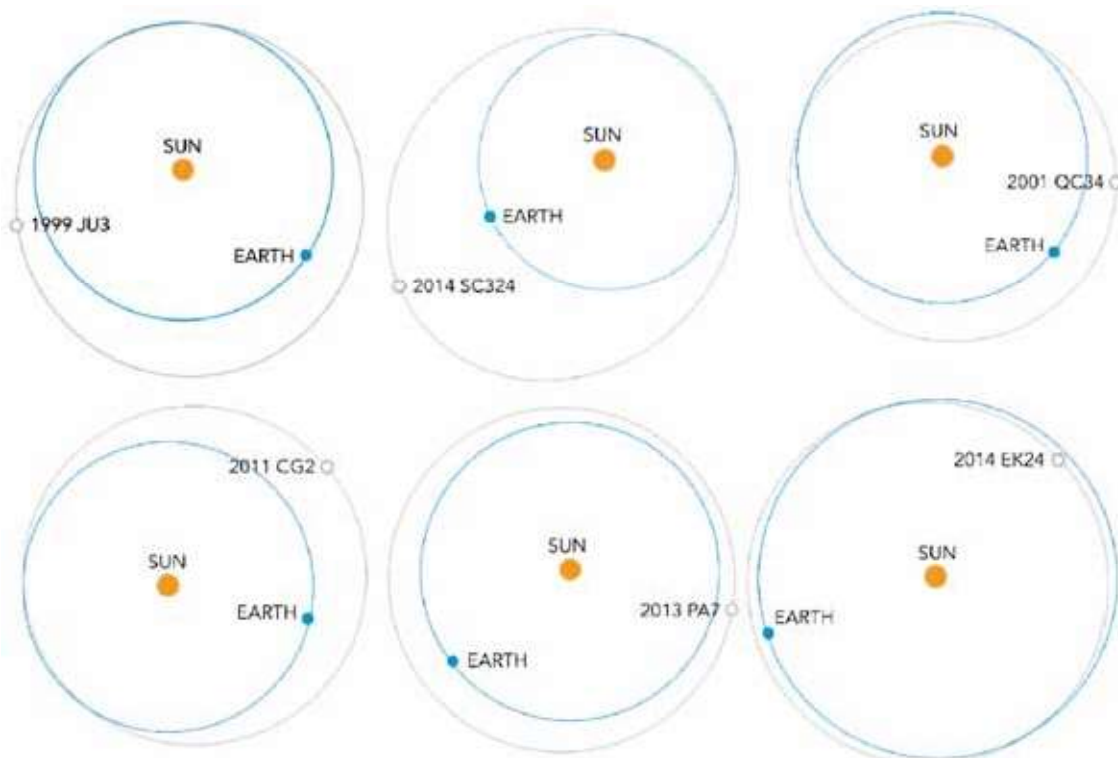
4. Techniczne aspekty dotyczące przemieszczania się sond w przestrzeni kosmicznej oraz lądowania na powierzchni asteroid i obiektów z grupy NEO

Ze względów praktycznych najlepszym rozwiązaniem jest eksploatacja asteroid z wykorzystaniem bezałogowych pojazdów kosmicznych. Załogowe loty na asteroidy wiążą się z koniecznością zapewnienia załodze niezbędnego do oddychania tlenu, a także żywności. Długi czas trwania lotu sprawia, że rozwiązanie takie jest niezwykle trudne do realizacji oraz wiąże się ze znacznym wzrostem kosztów misji. Biorąc pod uwagę duże odległości tych obiektów od Ziemi, misje takie byłyby na obecnym etapie rozwoju technologicznego zbyt niebezpieczne. Bezałogowe pojazdy do swojej pracy potrzebują energii. Obecnie najłatwiejszym sposobem generowania energii w przestrzeni kosmicznej jest wykorzystywanie ogniw słonecznych. Należy jednak brać pod uwagę spadek skuteczności ogniw zależny od odległości baterii słonecznej od Słońca. W odległości dalszej niż orbita Marsa ogniwa

słoneczne stają się praktycznie bezużyteczne ([Kew 2011](#)). Dlatego, najkorzystniejsza wydaje się eksploatacja metali z asteroid należących do grupy NEO. Asteroidy należące do tej grupy poruszają się po zamkniętych orbitach, których fragmenty znajdują się w odległości mniejszej niż 1/3 odległości między Słońcem, a Ziemią. Dzięki temu istnieje możliwość zbliżenia się do asteroidy wtedy, kiedy znajduje się ona stosunkowo blisko Ziemi, a jej odległość od Słońca pozwala na efektywne wykorzystanie energii słonecznej. Odległości tych obiektów od Ziemi w momencie największego zbliżenia się do planety wynoszą od ok. 6 do 20 wielokrotności odległości Ziemia-Księżyc (do ok. 8 000 000 km) ([Źródło internetowe 6](#)). W wypadku eksploatacji asteroid z Pasa Planetoid należy szukać innych źródeł energii. Jedną z propozycji są ogniwa słoneczne wyposażone w soczewki skupiające światło na ich powierzchni, zapewniające efektywną pracę w dużej odległości od Słońca ([Kew 2011](#)). Jednakże ze względu na znaczną odległość Pasa Planetoid od Ziemi łatwiejsze wydaje się pozyskiwanie surowców z obiektów NEO.

Istotną kwestią jest także zapewnienie pojazdom bezałogowym i robotom odpowiednio dokładnego systemu sterowania i kontroli. Poruszanie się w przestrzeni kosmicznej, a przede wszystkim operowanie na powierzchni asteroidy wymaga ogromnej precyzji. Ze względu na duże odległości, sygnały przemierzające przestrzeń z prędkością światła (fale radiowe) dotrą do pojazdu z pewnym opóźnieniem, mogącym wynosić nawet kilka minut ([Kew 2011](#)). Dlatego, maszyny pracujące na asteroidzie powinny być wyposażone w przynajmniej częściowo automatyczne systemy reagowania na anomalie i niebezpieczne sytuacje.

Asteroidy z grupy NEO są obiektami poruszającymi się ze znacznymi prędkościami względem Ziemi. Prędkości te wynoszą od ok. 3 do ponad 20 km/s ([Źródło internetowe 6](#)). Aby wylądować na takim obiekcie, pojazd kosmiczny musi zostać odpowiednio rozprędkowany, a następnie dostosować swoją prędkość do prędkości asteroidy. Najlepszym sposobem



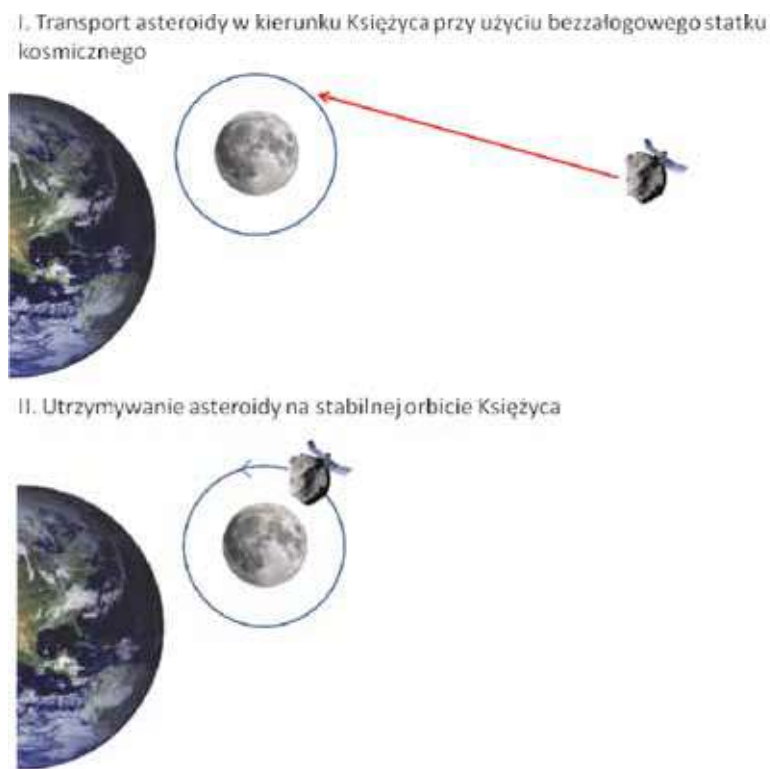
Rys. 3. Przykłady orbit obiektów grupy NEO ([Źródło internetowe 16](#))
Fig. 3. Examples of NEO group objects orbits ([Web source 16](#))

na rozpędzenie takiego pojazdu jest skorzystanie z tzw. asysty grawitacyjnej, polegającej na zwiększeniu prędkości i zmianie kierunku lotu na skutek działania pola grawitacyjnego dużego ciała niebieskiego. Jest to rozwiązanie wykorzystywane w większości prowadzonych obecnie misji kosmicznych. Pozwala ono na rozpędzenie pojazdów do znacznych prędkości, jednocześnie nie wymagając dużych nakładów energii. Odpowiednie zaplanowanie lotu pojazdu i wyznaczenie spodziewanego toru lotu asteroidy umożliwia zbliżenie się do niej, wykonanie niezbędnych badań i analiz, a w końcu lądowanie na jej powierzchni. W ten sposób przeprowadzane były wcześniej wspomniane misje takie jak *Hayabusa*, *Rosetta* czy *OSIRISREx*.

Duże odległości asteroid od Ziemi wymagają użycia odpowiedniego napędu. Obecnie istnieje kilka koncepcji dotyczących napędów statków kosmicznych. Podstawowym typem silników raketowych są silniki chemiczne, na paliwo stałe bądź ciekłe. Pozwalają one na osiągnięcie prędkości do ok. 10 km/s, a ich wadą jest konieczność zapewnienia zapasu paliwa, zwiększającego masę statku. Większe prędkości uzyskać można stosując napęd jonowy, w którym odrzut powodowany jest wyrzucaniem jonów rozpędzanych przez pole elektromagnetyczne. Napędy te charakteryzują się jednak małym przyspieszeniem i gorszą manewrowością niż konwencjonalne napędy chemiczne ([Źródło internetowe 7](#)). Rozwiązaniem, które może okazać się rewolucją w dziedzinie lotów kosmicznych jest napęd plazmowy, pozwalający na osiągnięcie prędkości kilkuset tys. km/h (ponad 50 km/s). Prace nad tym napędem prowadzone są od 1993 r. w ramach projektu VASMIR (ang. *V*ariable *S*pecific *I*mpulse *M*agnetoplasma *R*ocket) przez *Advanced Space Propulsion Laboratory* podlegającym NASA ([Źródło internetowe 8](#)). Inne prototypowe napędy, takie jak napęd elektromagnetyczny (*EmDrive*) czy fotonowy (*PLT*) są obecnie w fazie badań, lecz gdyby ich zastosowanie okazało

się możliwe, czas potrzebny na dotarcie do asteroidy zostałby znacznie skrócony.

Znaczącym utrudnieniem w eksploatacji asteroid są duże ich odległości od Ziemi. Dłuższa droga transportu materiału z asteroidy wiąże się ze zwiększeniem kosztów oraz wydłużeniem czasu trwania lotu. Dlatego poszukuje się sposobów na zmniejszenie tej odległości. Jednym z rozwiązań może być adaptacja rozwiązania przedstawionego w misji *ARM*. Zgodnie z tym pomysłem, asteroida mogłaby zostać przeniesiona w pobliże Księżyca, przy użyciu zakotwiczonych do jej powierzchni bezzałogowych pojazdów wyposażonych w odpowiedni napęd pozwalający na zmianę prędkości, trajektorii lotu i ruchu obrotowego asteroidy. Następnie, nadając asteroidzie prędkość orbitalną można utrzymać ją na stabilnej orbicie Księżyca. Dzięki takiemu rozwiązaniu znacznie zmniejsza się odległość, jaką musiałby pokonywać pojazdy lecące z Ziemi na asteroidę. Oczywiście nasuwa się pytanie, dlaczego nie umieścić asteroidy na orbicie okołoziemskiej. Otóż wiązałoby się to z szeregiem problemów, nie tylko utrudniających eksploatację asteroidy, lecz także stanowiących istotne zagrożenie dla Ziemi. Spośród nich wymienić można obecność licznych sztucznych satelitów na orbicie okołoziemskiej mogących zderzyć się z asteroidą, występowanie pasów radiacyjnych Van-Allena mogących zakłócać pracę urządzeń elektrycznych na orbicie, czy wreszcie ryzyko katastrofalnego w skutkach uderzenia asteroidy w Ziemię, w przypadku utraty kontroli nad jej orbitą. Ponadto na orbicie okołoziemskiej znajdują się duże ilości tzw. „złomu kosmicznego”, czyli pozostałości po rakietach oraz deorbitowanych stacjach kosmicznych, które niecałkowicie spłonęły w atmosferze. Inną możliwością jest wykorzystanie tzw. punktów libracyjnych Lagrange'a. W punktach tych ciało o stosunkowo niewielkiej masie może pozostawać w spoczynku względem układu dwóch ciał



Rys. 4. Ideowy schemat umieszczenia asteroidy na orbicie Księżyca

Źródło: opracowanie własne

Fig. 4. The schematic diagram for placing an asteroid on the Moon's orbit

Source: own elaboration. Source: own elaboration

niebieskich. Wykorzystując punkty libracyjne w układzie Ziemia-Słońce lub Ziemia-Księżyc można utrzymywać asteroidę w stałej odległości od Ziemi, ułatwiając tym samym jej eksploatację.

5. Metody urabiania i eksploatacji skał z powierzchni asteroid i obiektów z grupy NEO

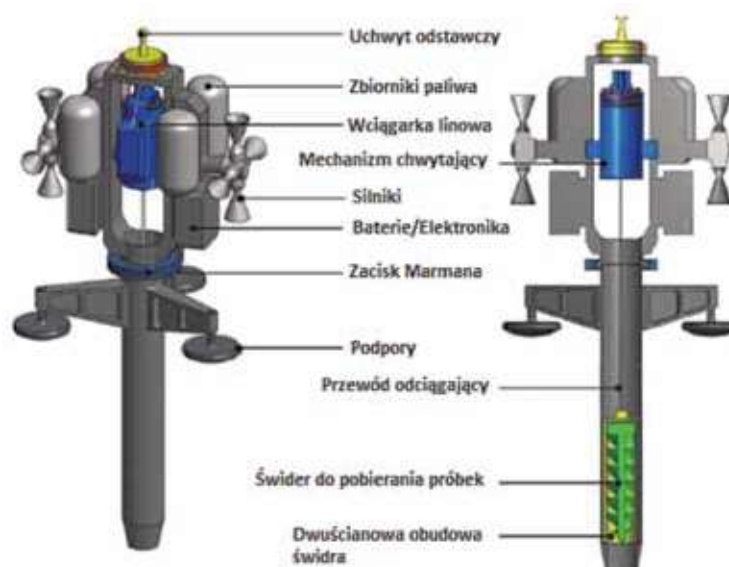
Najistotniejszą różnicą między eksploatacją prowadzoną na powierzchni Ziemi, a eksploatacją na powierzchni asteroidy jest występowanie stanu niskiej grawitacji. Wymusza on odpowiednie przytwierdzenie maszyn operujących na asteroidzie do jej powierzchni. Bezzałogowe pojazdy mogą wwiercać się w powierzchnię asteroidy, wykorzystywać specjalnie skonstruowane harpuny, liny, kotwie czy inne rozwiązania konstrukcyjne utrzymujące je na powierzchni (Hellgren 2016). Wybór metody eksploatacji zależy także od rozmiarów asteroidy. W przypadku obiektów o średnicy mniejszej niż 20 m rozważa się próby transportu asteroidy w całości. Dla większych obiektów sensowna wydaje się eksploatacja prowadzona bezpośrednio na ich powierzchni (Zacny i in. 2013).

W zależności od formy występowania cennego surowca, eksploatację prowadzić można na różne sposoby. Powierzchnia asteroid pokryta jest regolitem, czyli luźną i silnie zwietrzałą warstwą skalną, powstałą na skutek licznych zderzeń powodujących kruszenie skał. Taka forma występowania złoża ułatwia zarówno eksploatację, jak i dalszą przeróbkę materiału (Łuszczek 2011). Materiał tego typu można zbierać mechanicznie, pojazdami wyposażonymi w odpowiednie łyżki, szuffe bądź inne podobne organy pozwalające na ładowanie urobku (Ross 2001). W ten sposób bezzałogowe pojazdy mogłyby pozyskiwać urobek w formie luźnego regolitu wprost z powierzchni asteroidy. Dalsza przeróbka surowca w celu odseparowania cennych metali odbywałaby się w zakładach przerobczych na Ziemi. Inną metodą pozyskiwania materiału w formie drobnego pyłu jest zastosowanie urządzeń pneumatycznych, zasysających urobek z powierzchni asteroidy (Zacny i in. 2013). Możliwe jest także wykorzystanie świrdrów zamontowanych do pojazdów, które wwiercając się w powierzchnię asteroidy pozwalałyby

na zbieranie materiału w formie zwiercin (Ross 2001). Pył żelazowo-niklowy można przyciągać przy użyciu elektromagnesów, które zapewniają dokładne zbieranie surowca, przy stosunkowo niewielkim koszcie (Zacny i in. 2013). Przed rozpoczęciem prób eksploatacji ważne jest, aby uzyskać odpowiednie informacje na temat składu mineralnego regolitu. Rozpoznanie takie może zostać przeprowadzone przy użyciu odpowiednio skonstruowanych sond pozwalających na pobranie próbek bezpośrednio z powierzchni asteroidy. Przykładem takiego urządzenia jest projekt *ARProbe*, opracowany przez *American Institute of Aeronautics and Astronautics*. Sondy takie byłyby przenoszone przez większy statek, a następnie mogłyby lądować na powierzchni asteroidy i zbierać dane *in situ* (Zacny i in. 2013).

Znacznie trudniejsze wydaje się być pozyskiwanie materiału z twardszych, litych, zwięzłych skał. W warunkach ziemskich podstawową metodą urabiania skał zwięzłych jest wykorzystywanie materiałów wybuchowych. Wykorzystanie techniki strzelniczej pozwala na otrzymywanie dużych ilości dobrze rozdrobionego urobku, co ułatwia proces przeróbki kopaliny. Jednakże w przestrzeni kosmicznej wykorzystanie ładunków wybuchowych jest zagadnieniem znacznie bardziej skomplikowanym. Detonacja ładunku wybuchowego w stanie nieważkości przebiega inaczej niż w warunkach ziemskiej grawitacji. Należy pamiętać, że detonacja MW na powierzchni asteroidy będzie źródłem energii kinetycznej powodującym zmiany w trajektorii lotu obiektu, takie jak nadanie rotacji, zmiany orbity czy prędkości asteroidy. Dodatkowo, ze względu na słabe oddziaływanie grawitacyjne asteroidy, odstrzelony urobek nie będzie opadał grawitacyjnie na powierzchnię asteroidy i może zostać wyrzucony w przestrzeń kosmiczną. Rozwiązaniem mogą być specjalnie wykonane siatki utrzymujące odstrzelony urobek na powierzchni asteroidy.

Zwięzłe skały na asteroidzie można także urabiać mechanicznie. Rozważa się zastosowanie specjalnych świrdrów wwiercających się w twardsze skały lub urządzeń wyposażonych w zęby, bądź dyski tnące (Ross 2001) - podobne do stosowanych obecnie kombajnów frezujących czy skrawających. W ten sposób, możliwe byłoby kruszenie i rozluźnienie materiału, zbieranego następnie w sposób mechaniczny bądź pneumatyczny.



Rys. 5. Schemat sondy ARProbe (Zacny i in. 2013)

Fig. 5. Probe ARProbe scheme (Zacny et al. 2013)

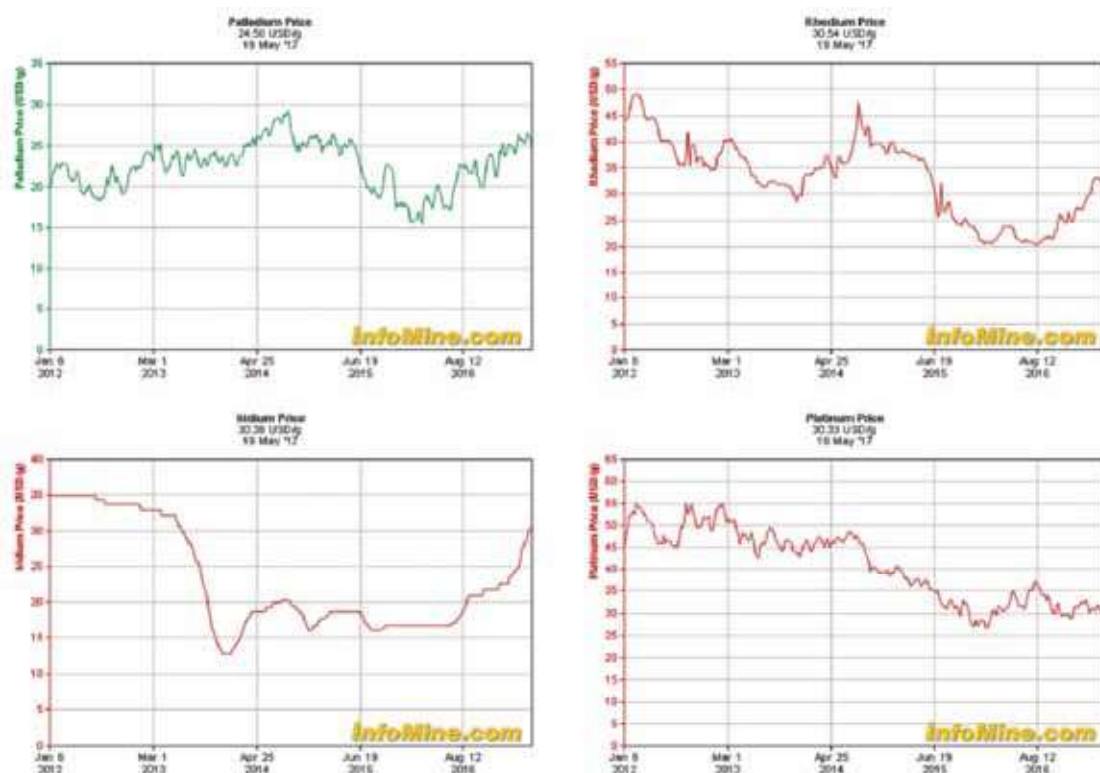
6. Przewidywane korzyści ekonomiczne wynikające z eksploatacji powierzchni asteroid

Biorąc pod uwagę wysokie ceny metali z grupy platynowców, podjęcie się eksploatacji ich źródeł pochodzenia kosmicznego wydaje się uzasadnione ekonomicznie. Ceny tych metali wahają się w okolicach 1000 \$ za 1 uncję (ok. 31,1 g). Na rysunku 2 przedstawiono wykresy zmian cen metali z grupy platynowców w latach 2012-2016. Zakładając, że skład asteroid określony za pomocą metod spektroskopowych i analiz ziemskich chondrytów jest taki sam jak skład asteroid grupy NEO i tych z Pasa Planetoid, sprzedaż pozyskanych platynowców oraz żelaza i niklu może przynieść ogromne zyski. Pewne szacunki tych zysków zostały przedstawione na stronie internetowej *asterank.com*. Opierając się na danych i materiałach pochodzących m.in. z zasobów NASA i MIT oszacowano potencjalny zysk jaki może przynieść eksploatacja asteroid zarówno z grupy NEO, jak i z Pasa Planetoid. Zgodnie z szacunkami, asteroidy o średnicy kilkuset metrów, takie jak Ryugu (~900 m), czy Bennu (~492 m) ([Źródło internetowe 13](#)) mogą przynieść zyski rzędu miliardów dolarów. Największe obiekty, jak np. Chiron o średnicy ok. 166 km, zawierają zasoby warte setki trylionów dolarów. Przykładowe dane ze strony *asterank.com* zestawiono w tabeli 1. W kolejnych latach można spodziewać

się coraz nowocześniejszych rozwiązań technologicznych, które przyniosą obniżenie kosztów lotów kosmicznych, lecz nawet przy obecnej technologii eksploatacja platynowców z powierzchni asteroid wydaje się opłacalna. Zakładając, że koszty przyszłych wypraw byłyby porównywalne z kosztami przeprowadzanych obecnie misji (takich jak *OSIRIS-REx*), wynosząc ok. 1 mld dolarów ([Źródło internetowe 9](#)), trwające kilka lat przedsięwzięcie powinno pokryć koszty operacji i przynieść przedsiębiorcy zysk.

7. Aspekty prawne związane z gospodarczym wykorzystaniem przestrzeni kosmicznej

Ważnym zagadnieniem dotyczącym eksploatacji zasobów kosmosu są aspekty prawne. Obecnie nie ma międzynarodowych przepisów prawnych określających zasady pozyskiwania surowców z obiektów pozaziemskich przez różne kraje. Pierwsze regulacje w tej kwestii próbowano ująć w *Traktacie o Przestrzeni Kosmicznej* podpisanym w 1967 r. przez przedstawicieli rządów Stanów Zjednoczonych, Związku Radzieckiego i Wielkiej Brytanii. Zgodnie z traktatem, dostęp do wszystkich ciał niebieskich powinien być wolny, niezależnie od rozwoju gospodarczego i naukowego kraju. Żadne państwo nie może przywłaszczyć sobie praw



Rys. 6. Wykresy przedstawiające zmiany cen platynowców wg Londyńskiej Giełdy Metali w okresie 5 lat: irydu, platyny, palladu i rodu w latach 2012-2016 ([Źródło internetowe 17](#))

Fig. 6. Graphs of platinum price changes acc. to London Metal Exchange over 5 years period: iridium, platinum, palladium and rhodium in 2012-2016 ([Web source](#))

Tabela 1. Zestawienie szacowanych zysków z eksploatacji surowców z przykładowych obiektów NEO ([Źródło internetowe 14](#))

Table 1. Summary of estimated profits on raw materials from exemplary NEO objects ([Web source 14](#))

Asteroida	Średnica	Wartość surowców	Zysk
Bennu	510 m	9,05 mld USD	2,5 mld USD
Kenos	2950 m	39,19 bln USD	2,81 bln USD
Hungaria	8900 m	93,54 bln USD	6,61 bln USD

do użytkowania obiektu pozaziemskiego w celach gospodarczych, a wszelkie badania i działania w przestrzeni kosmicznej powinny służyć dobru całej ludzkości (Międzynarodowy Traktat o Przestrzeni Kosmicznej 1967 r.). W 1979 r. wszedł w życie Traktat Księżycowy, w myśl którego wykorzystywanie zasobów Księżyca i innych obiektów pozaziemskich powinno być nadzorowane przez międzynarodowy organ nadzorczy (Nelson 2015). Przełomowym aktem prawnym mającym duży wpływ na przyszłość górnictwa kosmicznego okazała się podpisana przez prezydenta Stanów Zjednoczonych Baracka Obamę w 2015 r. ustawa *SPACE Act of 2015*. Zgodnie z nią, obywatele Stanów Zjednoczonych mają prawo do komercyjnej eksploracji i eksploatacji zasobów pochodzących z ciał niebieskich, w tym wody i cennych metali, z wyłączeniem potencjalnych organizmów żywych. Eksploatacja ma odbywać się pod kontrolą odpowiednich organów nadzorczych rządu Stanów Zjednoczonych (U.S. Commercial Space Launch Competitiveness Act 2015). Zawężenie upoważnionych przedsiębiorców do obywateli Stanów Zjednoczonych jest punktem budzącym pewne kontrowersje i niejako dyskryminującym obywateli innych krajów świata. Najlepszym rozwiązaniem wydaje się utworzenie międzynarodowego organu nadzorującego eksploatację ciał niebieskich, (np. Międzynarodowa Agencja Kosmiczna), w skład którego wchodziłoby przedstawiciele krajów zaangażowanych w prace dotyczące pozyskiwania surowców z obiektów pozaziemskich lub Krajowe Agencje Kosmiczne.

8. Podsumowanie

Chociaż pozyskiwanie metali z grupy platynowców z powierzchni asteroid wydaje się obecnie odległą w czasie perspektywą, już teraz warto prowadzić badania i teoretyczne rozważania pozwalające na przygotowanie metod i technik prowadzenia eksploatacji i transportu cennych surowców na Ziemię. Biorąc pod uwagę ograniczone zasoby tych metali na Ziemi oraz ich kluczową rolę w wielu gałęziach nowoczesnych technologii, uzasadnione wydaje się poszukiwanie ich źródeł poza naszą planetą, szczególnie uwzględniając asteroidy, zawierające te metale w ilościach znacznie większych niż całe ziemskie złoża. Wysokie ceny tych metali wraz z rosnącym zapotrzebowaniem stanowią ekonomiczne uzasadnienie takiego przedsięwzięcia. Występowanie złóż w postaci luźnego regolitu powinno ułatwić zarówno pozyskiwanie, jak i przeróbkę materiału pochodzącego z asteroidy, a zastosowanie odpowiednich metod mechanicznych, wiertniczych czy pneumatycznych pozwoli na eksploatację twardszych, zwięzłych skał. Chociaż przeprowadzenie takiej misji wiąże się z dużymi kosztami i niesie ze sobą znaczne ryzyko, dokładne rozpoznanie asteroidy i odpowiednio zaplanowany sposób eksploatacji pozwoli na pozyskanie platynowców w ilościach zapewniających pokrycie ziemskiego zapotrzebowania. Oprócz platynowców asteroidy zawierają w swoim składzie surowce, takie jak żelazo, nikiel czy woda, które mogą znaleźć wykorzystanie przy tworzeniu infrastruktury w przestrzeni kosmicznej, związanej z kolejnymi misjami, których celem będzie eksploracja, a nawet kolonizacja kosmosu.

Literatura

BLAIR B.R., 2000 – The Role of Near-Earth Asteroids in Long-Term Platinum Supply. EB353 Metal Economics, Colorado School of Mines.

- HELLGREN V., 2016 – Asteroid Mining. A Review of Methods and Aspects. Department of Physical Geography and Ecosystem Science, Lund University, Lund.
- KEW J., 2011 – Methods for Extracting Metals from Asteroids. Massachusetts Academy of Math and Science, Massachusetts.
- LUSZCZEK K., 2011 – Poszukiwania nowych zasobów surowców w Układzie Słonecznym. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- LUSZCZEK K., PRZYLIBSKI T. A., 2011 – Skład chondrytów zwyczajnych a potencjalne surowce pasa planetoid. Rocznik Polskiego Towarzystwa Meteorologicznego, Vol. 2.
- MATTHEY J., 2016 – Summary of Platinum Supply & Demand in 2015. PGM Market Report May 2016.
- Mineral Commodity Summaries (MCS), U. S. Geological Survey, 2017: Platinum-Group Metals.
- NELSON T.G., 2015 – Mining Outer Space: Who Owns the Asteroids? New York Law Journal, vol. 254 - no. 19.
- ROSS S.D., 2001 – Near-Earth Asteroid Mining. Control and Dynamical Systems, Caltech, Pasadena.
- THOLEN D.J., 1989 – Asteroid taxonomic classifications. Asteroids II. University of Arizona Press, Tuscon.
- U.S. Commercial Space Launch Competitiveness Act 2015, 129 Stat. 704 Public Law 114-90—NOV. 25, 2015
- ZACNY K., CHU P., CRAFT J., 2013 – Asteroid Mining. AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition, San Diego.

Źródła internetowe

- Źródło internetowe 1: Strona internetowa NASA- misja Voyager: <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/index.html>
- Źródło internetowe 2: Strona internetowa NASA - misja Galileo: <https://solarsystem.nasa.gov/missions/galileo/indepth>
- Źródło internetowe 3: Strona internetowa NASA - misja NEAR: <https://solarsystem.nasa.gov/missions/near/indepth>
- Źródło internetowe 4: Strona internetowa misji Hayabusa: http://global.jaxa.jp/projects/sat/muses_c/
- Źródło internetowe 5: Strona internetowa misji Rosetta: <http://rosetta.esa.int/>
- Źródło internetowe 6: Strona internetowa Laboratorium Napędu Odrzutowego NASA (JLP): <https://cneos.jpl.nasa.gov/ca>
- Źródło internetowe 7: Strona internetowa NASA: <https://www.nasa.gov/centers/glenn/about/fs21grc.html>
- Źródło internetowe 8: Strona internetowa NASA: https://www.nasa.gov/vision/space/travelingspace/future_propulsion.html
- Źródło internetowe 9: Strona internetowa misji OSIRIS-REX: <https://www.nasa.gov/osiris-rex>
- Źródło internetowe 10: Strona internetowa misji ARM: <https://www.nasa.gov/content/what-is-nasa-s-asteroid-redirect-mission>
- Źródło internetowe 11: Strona internetowa przedsiębiorstwa Deep Space Industries: <http://deepspaceindustries.com/mining/>
- Źródło internetowe 12: Strona internetowa przedsiębiorstwa Planetary Resources: <http://www.planetaryresources.com/technology/#technology-value-statement>
- Źródło internetowe 13: Strona internetowa Laboratorium Napędu Odrzutowego NASA (JPL): <https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi>
- Źródło internetowe 14: Strona internetowa asterank.com – baza danych na temat lokalizacji asteroid
- Źródło internetowe 15: Strona internetowa NASA - misja ARM: <https://www.nasa.gov/content/what-is-nasa-s-asteroid-redirect-mission>
- Źródło internetowe 16: Strona internetowa Planetary Resources: <http://www.planetaryresources.com/asteroids>
- Źródło internetowe 17: Strona internetowa Notowań Londyńskiej Giełdy Metali: <http://www.infomine.com/investment/warehouse-levels>

Artykuł wpłynął do redakcji – czerwiec 2017
Artykuł akceptowano do druku 20.08.2017