



Tytuł opracowania: **Ekspertyza dotycząca koncepcji polskiego instrumentu naukowego dla przyszłych misji badawczo pomiarowych (księżycowych)**

Autor ekspertyzy: dr hab. Karol Seweryn

Opracowanie wykonane na zlecenie: Polska Agencja Kosmiczna

Rok opracowania: 2025

Spis treści

1	STRESZCZENIE WYKONAWCZE	3
2	WPROWADZENIE	3
3	CEL EKSPERTYZY	5
4	ZAKRES EKSPERTYZY	5
5	ANALIZA STANU WIEDZY	5
	5.1 Ogólne dane o Księżycu	5
	5.2 Całkowite promieniowanie słoneczne	5
	5.3 Albedo	5
	5.4 Poczerwień	6
	5.5 Egzosfera	6
	5.6 Regolit księżycowy	7
	5.7 Misje kosmiczne po erze Apollo	11
6	ANALIZA KOMPETENCJI I POTENCJAŁU W POLSCE	16
7	PROPOZYCJA EKSPERYMENTU NAUKOWEGO	16
8	PLAN ROZWOJU TECHNOLOGII / ŚCIEŻKA TRL	22
9	MOŻLIWOŚCI WSPÓŁPRACY MIĘDZYNARODOWEJ	22
10	ANALIZA RYZYK I BARIER	23
11	REKOMENDACJE STRATEGICZNE	24
12	PODSUMOWANIE	24
13	BIBLIOGRAFIA I ŹRÓDŁA	25

1 Streszczenie wykonawcze

Celem ekspertyzy jest przedstawienie propozycji instrumentu naukowego, który może zostać zgłoszony do misji ESA/NASA w latach 2027–2035 na podstawie dostępnych źródeł. Zaproponowany instrument PETER umożliwi prowadzenie badań geotechnicznych in-situ warstw powierzchniowych i podpowierzchniowych Księżyca. Ekspertyza omawia kluczowe aspekty zaproponowanego instrumentu tj.: identyfikacja luki naukowej i priorytetowych pytań badawczych, opis funkcji i architektury proponowanego instrumentu, wstępne wymagania środowiskowe i techniczne i orientacyjną ścieżkę podnoszenia TRL, na podstawie przedstawionych publikacji i doświadczeń autora ekspertyzy.

W ekspertyzie przedstawiono rekomendacje umożliwiające realizację eksperymentu PETER w perspektywie 5 lat. Są to między innymi realizacja kolejnych projektów i aktywność administracji rządowej. Ekspertyza bazuje na dotychczasowych osiągnięciach naukowych i technologicznych CBK PAN oraz możliwościach technologicznych sektora przemysłowego w Polsce. Koncepcja eksperymentu została przedstawiona na rysunku 5. W dużej mierze jest ona oparta na pozytywnych wynikach realizacji projektu DIGGER dla ESA.

2 Wprowadzenie

Obecne i przyszłe badania planet w naszym Układzie Słonecznym, wraz z ich księżycami, kometami i asteroidami, są niezwykle trudne z technicznego, politycznego i komercyjnego punktu widzenia [1], [2]. Operacje kosmiczne znacznie różnią się od tych na Ziemi ze względu na nietrywialny wpływ grawitacji (która zazwyczaj jest niższa niż na Ziemi), ograniczoną masę i moc urządzeń pracujących w kosmosie, ekstremalne temperatury oraz próżnię. Działania związane z wykorzystaniem zasobów kosmicznych (ISRU) stają się coraz bardziej istotne we wszystkich kluczowych agencjach kosmicznych, a społeczność międzynarodowa dąży do dwóch celów: powrotu na Księżyc oraz eksploracji małych asteroid i komet. W obu przypadkach działania te mają doprowadzić w dłuższej perspektywie do lądowania ludzi na Marsie. Przykładowy podział ISRU został przedstawiony w [3], [4] - autorzy podzielili je na funkcjonalne bloki, takie jak: oceny zasobów (poszukiwanie, pozyskiwanie zasobów, przetwarzanie zasobów); narzędzia; budowa in situ; produkcja z surowcem ISRU; oraz energię in situ. Każdemu z elementów tworzących te bloki funkcjonalne przypisano poziom gotowości technologicznej (TRL), odzwierciedlający aktualny stan rozwoju.

Eksploracja i eksploatacja materiałów kosmicznych jest powiązana z górnictwem kosmicznym. Przegląd aktywności związanych z górnictwem kosmicznym przedstawiony został w rozdziale siódmym monografii [5]. Analiza górnictwa pozaziemskiego została przedstawiona również w branżowej publikacji [6]. Przykład koncepcji księżycowej kopalni odkrywkowej został opisany w [7]. Autorzy przedstawiają w niej koncepcje ekonomicznie uzasadnionej kopalni odkrywkowej działającej w środowisku księżycowym.

Na poziomie międzynarodowym istnieje inicjatywa International Space Exploration Coordination Group (ISECG), której członkowie opracowują globalną mapę drogową eksploracji, która przedstawia wspólną międzynarodową wizję eksploracji kosmosu, zarówno w kontekście załogowym jak i robotycznym [8]. Raport ten odzwierciedla strategię eksploracji, która zaczyna się od Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS) i rozciąga się na Księżyc, asteroidy, Marsa i inne miejsca Układu Słonecznego. Dodatek do powyższego raportu [9] opublikowany w 2020 roku, aktualizuje scenariusz eksploracji powierzchni Księżyca (LSES) o kolejne elementy architektoniczne oraz szczegóły kampanii eksploracyjnej. LSES podzielony jest na następujące trzy etapy:

- 1 – Boots on the Moon
- 2A – Expanding and building
- 2B – Sustained lunar opportunities

Scenariusz opisuje działania na orbicie Księżyca i powierzchni Księżyca oraz omawia powstanie stacji orbitalnej Gateway na orbicie księżycowej w kontekście misji NASA Artemis oraz termin nadchodzących misji robotów opracowanych przez agencje kosmiczne na całym świecie.

Europejska Agencja Kosmiczna (ESA) opracowała mapę działań związanych z eksploracją Terrae Novae 2030+ [10]. Raport ten definiuje główne długoterminowe cele Europy – mianowicie zdolność do wynoszenia i dostarczania ładunków na ISS jako laboratorium do demonstracji technologii księżycowych, a następnie

dostarczania tych technologii na Księżyc i Marsa. W kontekście Księżyca Europa dąży do osiągnięcia strategicznej autonomii w swoich działaniach eksploracyjnych na, w tym w zakresie mobilności powierzchniowej. Strategia dzieli się na trzy główne kroki:

Po pierwsze, dostęp do orbit księżycowych – w tym kontekście kluczowy jest program Gateway jako element programu Artemis.

Drugi krok dotyczy dostępu do powierzchni księżyca i kreowanie pierwszych usług księżycowych. Planowane są instrumenty naukowe, demonstracja technologii oraz misja demonstracyjna ISRU (ISRU-DM) z wykorzystaniem komercyjnych i/lub międzynarodowych misji księżycowych. W tym kontekście europejska misja Argonaut może stać się fundamentem umożliwiającym trwałą europejską eksplorację Księżyca.

Na arenie krajowej szereg podmiotów prowadzi działania związane z eksploracją kosmosu. W 2023 r. Polska Agencja Kosmiczna (POLSA) ogłosiła konkurs na studium wykonalności misji na Księżyc. Polskie instytucje i firmy rozwijają szereg projektów związanych z eksploracją Księżyca, których przykłady przedstawione są poniżej:

- Moon Harvesting – projekt finansowany przez Narodowe Centrum Nauki, związany z inżynierią lądową i wydobywaniem kosmicznym na Księżycu. Projekt realizowany przez CBK PAN, AGH i UWM.
- DIGGER – projekt zrealizowany przez Centrum Badań Kosmicznych (CBK PAN), którego celem była budowa urządzenia RCE na poziomie TRL 6. Projekt sfinansowany przez ESA.
- Mirrores – marsjański spektrometr rudy w dalekiej podczerwieni, który można zastosować w kontekście Księżyca do poszukiwania ilmenitu;
- Galago – projekt finansowany przez ESA zrealizowany przez firmę Astronika, związana z lokomocją na Księżycu;
- Compactor – projekt finansowany przez ESA zrealizowany przez firmę Astronika, związany z rozwojem urządzeń do ubijania regolitu księżycowego;
- PETER – PFC – projekt realizowany przez CBK PAN polegający na przeprowadzeniu testów urządzenia RCE w warunkach grawitacji księżycowej (lot paraboliczny). Projekt sfinansowany przez ESA.
- DISTANT – projekt realizowany przez firmę PIAP Space – projekt dotyczy rozwoju systemów zdalnej transmisji i sterowania łazików w ekstremalnych środowiskach. Projekt finansowany przez ESA i kierowany przez GMV.
- GALEON – projekt w ramach inicjatywa Ground Based Autonomous Rover Demonstrator (GBARD) (Naziemny Demonstrator Autonomicznego Łazika). PIAPS Space w pierwszej fazie projektu jest odpowiedzialny za zaprojektowanie i opracowanie koncepcji systemu zawieszenia oraz systemu robotycznego składającego się z ramienia oraz systemu wymiennych chwytaków.
- MANUS - PIAPSpace opracowuje prototyp (breadboard) ramienia robotycznego na potrzeby misji ARGONAUT Europejskiej Agencji Kosmicznej
- Budowa brudnej komory próżniowej na Wydziale Technologii Kosmicznych AGH
- Budowa systemu testowania podwozia lądownika w CBK PAN – współpraca z firmą SENER w ramach projektu finansowanego przez ESA

Powyższe działania wpisują się w Polską Strategię Kosmiczną.

Niniejsza ekspertyza powstała na podstawie publikacji przedstawionych w rozdziale 13, udziału autora w grupach eksperckich tj. Moon Team (grupa powołana przez ESA), Peraspera (grupa powołana przez EU); udziału autora w konferencjach naukowych: ASTRA, Space Resource week, ISRU Roundtable, KGK conference on space resources, CARO conference, AIAA Science, ASCE Earth & Space; dyskusjach autora z podmiotami polskimi zainteresowanymi eksploracją Księżyca. Ekspertyza ta nakreśla jeden z możliwych kierunków rozwoju sektora kosmicznego w Polsce związanego z eksploracją Księżyca polegający na budowie i dostawie instrumentu lotnego PETER przeznaczonego do pracy na powierzchni Księżyca.

3 Cel ekspertyzy

Celem ekspertyzy jest przedstawienie propozycji instrumentu naukowego PETER, który może zostać zgłoszony do misji ESA/NASA w latach 2027–2035 na podstawie dostępnych źródeł. Ekspertyza umożliwi dyskusje i negocjacje administracji państwowej udziału podmiotów z Polski w przyszłych misjach kosmicznych na powierzchni Księżyca.

4 Zakres ekspertyzy

Zakres niniejszej ekspertyzy obejmuje:

- identyfikacja luki naukowej i priorytetowych pytań badawczych w odniesieniu do powierzchni Księżyca,
- opis funkcji i architektury zaproponowanego instrumentu PETER,
- wstępne wymagania środowiskowe i techniczne instrumentu PETER,
- orientacyjną ścieżkę podnoszenia TRL instrumentu PETER,
- interoperacyjność z platformami ESA/NASA instrumentu PETER. Ten element jest znacznie ograniczony ze względu na brak szczegółowych informacji dotyczących platform ESA/NASA przeznaczonych do pracy na powierzchni Księżyca.

5 Analiza stanu wiedzy

Niniejsza analiza obejmuje stan wiedzy dotyczący powierzchni Księżyca i została opracowana na podstawie przytoczonych źródeł.

5.1 Ogólne dane o Księżycu

Ogólne dane o Księżycu w odniesieniu do Ziemi pochodzą z Wikipedii i są przedstawione w Tabeli 1.

Tabela 1 Ogólne dane o Księżycu

Parametr	Księżyc	Ziemia
Masa	7,3531022 kg	5,9761024 kg
Promień	1738 km	6371 km
Powierzchnia	37,9106 km ²	510,1106 km ²
S płaszczanie*	0.0005	0.0034
Średnia gęstość	3,34 g/cm ³	5,517 g/cm ³
Grawitacja na równiku	1,62 m/s ²	9,81 m/s ²
Prędkość ucieczki na równiku	2,38 km/s	11,2 km/s
Czas obrotu gwiazdowego	27,322 dni	23,9345 godz.
Nachylenie równika/orbity	6°41'	23°28'
Średnia temperatura powierzchniowa	107°C w dzień; -153°C w nocy	22°C
Ekstremalne temperatury	-233°C(?) do 123°C	-89°C do 58°C
Atmosfera	~10 ⁴ cząsteczek/cm ³ dzień noc	2,5*10 ¹⁹ cząsteczek/cm ³ (STP) 10 ⁹ cząsteczek/cm ³ w LEO***
Moment bezwładności (I/MR ²)	0.395	0.3315
Przepływ ciepła (średnia)	~29 mW/m ²	63 mW/m ²

5.2 Całkowite promieniowanie słoneczne

Całkowite promieniowanie słoneczne na Księżycu wynosi 1361 W/m² z niepewnością 1,5 W/m²,

5.3 Albedo

Średnie albedo Księżyca wynosi około 0,12. Jednak elementy topologii Księżyca mają albedo od około 0,06 do około 0,30. Albedo ma tendencję do powiększania się na dużych szerokościach geograficznych i blisko obszarów polarnych. Przyjmuje się, że albedo nie zmienia charakterystyki spektralnej światła słonecznego.

5.4 Poczerwień

Promieniowanie podczerwone emitowane przez Księżyc znacznie się zmienia ze względu na dość niskie albedo, brak atmosfery księżycowej oraz niskie efektywne przewodzenie ciepłe regolitu. Maksymalny strumień w punkcie substuncyjnym wynosi około 1330 W/m², natomiast minimalny strumień emitowany przez zacienioną powierzchnię Księżyca to około 5 W/m².

5.5 Egzosfera

Pył księżycowy pochodzi z księżycowego regolitu, warstwy skał i drobnoziarnistych cząstek na powierzchni Księżyca, której grubość może wahać się od około 3 m do 20 m. Cząstki tworzące regolit powstały w wyniku miliardów lat uderzeń meteoroidów, a późniejsze wietrzenie przestrzeni przez cykl termiczny, erozję wiatru słonecznego oraz uderzenia doprowadziły do rozdrobnienia i aglutynacji oryginalnych cząstek. Gleby księżycowe można zazwyczaj opisać za pomocą rozkładów logarytmicznych o średnich średnicach zwykle od 45 μm do 100 μm; chociaż cząstki mogą mieć nawet 100 nm. Morfologie ziaren mogą się różnić od bardzo nieregularnych i kanciastych po kuliste szklane kulki powstające podczas uderzeń meteorytów o powierzchnię Księżyca.

Pył w księżycowym regolicie zawiera szereg minerałów, w tym plagioklasy, oliwin i piroksen, ilmenit oraz metale takie jak Fe i Ni. Ich ilość różni się w zależności od lokalizacji. Ogólnie bazaltowe tereny księżycowej są znacznie bogatsze w ilmenit i oliwin, podczas gdy bardziej prymitywne wyżyny księżycowe dominują anortozyty. Rzeczywisty skład gleb księżycowych jest jednak bardzo lokalny, co wskazuje na ograniczony zakres mieszania. Skład może się również zmieniać w zależności od wielkości ziaren; minerały sprzyjające rozdrobnieniu (np. anortyty w skaleniu) mają tendencję do tworzenia mniejszych rozmiarów cząstek niż te z oliwinów i piroksenów, których właściwości są mniej sprzyjające rozdrobnieniu. Najmniejsze cząstki mają tendencję do gromadzenia się w większe, aglutynowane cząstki. Typowy skład został przedstawiony w Tabeli 3.

Tabela 3 Skład chemiczny pyłu księżycowego.

Major Compositional Elements	Maria (%) (wt)	Highlands (%) (wt)
SiO ₂	40.09	44.2
TiO ₂	9.23	0.26
Al ₂ O ₃	10.70	29.4
Cr ₂ O ₃	0.49	-
FeO	17.85	2.96
MnO	0.24	0.6
MgO	9.92	16.3
CaO	10.59	0.73
Na ₂ O	0.36	0.11
K ₂ O	0.08	-

Pył po oświetlonej stronie Księżyca jest wystawiony na działanie fotonów ultrafioletowych i rentgenowskich oraz plazmy wiatru słonecznego. Następuje ładowanie, zdominowane przez emisję fotonów. Przewodność elektryczna regolitu wynosi zazwyczaj 10⁻¹² – 10⁻¹⁴ Ω⁻¹m⁻¹, co jest na tyle niskie, że cząstki pyłu mogą zatrzymywać ładunek. Czas rozpraszania ładunku przez kontakt z regolitem i otaczającą plazmą różni się znacznie w zależności od lokalnej temperatury, środowiska i warunków oświetlenia. Lokalne różnice w topografii i składzie mogą mieć istotny wpływ na rzeczywiste obciążenie i potencjał powstawania pyłu.

Podczas krótkich okresów spędzonych na Księżycu podczas Apollo stało się jasne, że pył księżycowy może stanowić poważne problemy zarówno dla operacji astronautów, jak i sprzętu. Stwierdzono, że pył przylega do ubrań i sprzętu, zmniejszał widoczność podczas lądowania, urządzenia mechaniczne zostały poważnie uszkodzone przez zanieczyszczenie pyłem księżycowym, a elementy optyczne pokryto widocznymi warstwami pyłu. Skafandry astronautów Apollo pokrywały się drobnoziarnistym pyłem, co powodowało trudności z oddychaniem i utrudnianie widzenia. Ponadto stwierdzono, że pył uniemożliwia skuteczne uszczelnianie pojemników pod ciśnieniem i dekompresją.

Uważa się, że pola elektryczne generowane na powierzchni wystarczają, by powodować lewitację małych cząstek pyłu, co potwierdzają liczne obserwacje powierzchniowe, eksperymenty laboratoryjne i modele numeryczne. Sondy Surveyor 5, 6 i 7 zaobserwowały "poświatę horyzontu" wzdłuż zachodniego horyzontu Księżyca po zachodzie słońca. Ten blask przypisywano rozpraszaniu światła słonecznego do przodu przez elektrostatycznie unoszące się ziarenka pyłu o średnicy <math><10\ \mu\text{m}</math>, na wysokościach 10–30 cm.

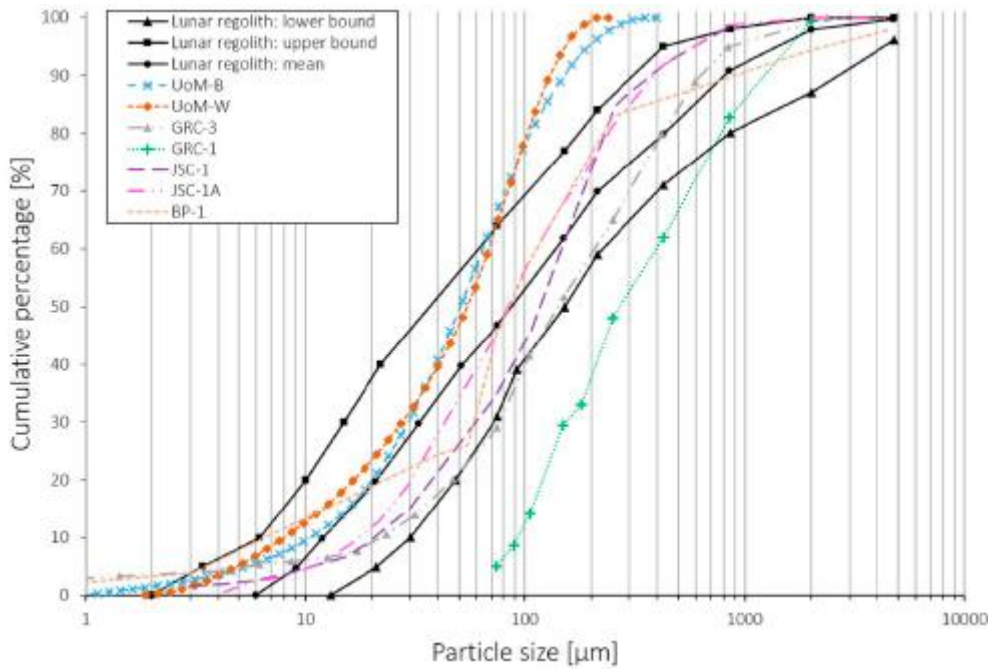
5.6 Regolit księżycowy

Regolit księżycowy i symulanty regolitu księżycowego zostały opisane poniżej na podstawie szeregu publikacji. Kluczową jest podsumowanie [13] przygotowane na podstawie misji Apollo. Poniżej przedstawiono chemiczne porównanie księżycowego regolitu i symulanta Księżyca UoM-B i UoM-W [11]. Dane o regolitach księżycowych oparte na publikacji [12].

Tabela 4 Porównanie regolitu i wybranych symulantów [11].

	Regolith - Mare [wt%]		Regolith - Highland [wt%]	Analogue materials	
	High Ti	Low Ti	Apollo 16	UoM-B	UoM-W
	Apollo 11	Apollo 12			
SiO ₂	42.17	46.17	45.09	30.99	68.24
TiO ₂	7.67	3.07	0.56	0.22	0.06
Al ₂ O ₃	13.78	13.71	27.18	3.30	1.40
Cr ₂ O ₃	0.3	0.35	0.107	–	–
Fe ₂ O ₃	–	–	–	51.73	0.13
FeO	15.76	15.41	5.18	(46.55)	(0.12)
MgO	8.17	9.91	5.84	2.07	5.21
CaO	12.12	10.55	15.79	3.14	9.06
MnO	0.21	0.22	0.065	0.43	0.01
Na ₂ O	0.44	0.48	0.47	0.83	13.40
K ₂ O	0.15	0.27	0.11	0.62	1.07
P ₂ O ₅	0.12	0.31	0.12	0.17	0.33
SO ₃	–	–	–	1.72	0.08
LOI	–	–	–	0.88	0.00
Total	100.89	100.45	100.51	96.10 (90.92)	98.99 (98.98)

Własności geotechniczne regolitu przedstawiono na podstawie rozkładu wielkości ziaren (rys. 1 i Tabela 5) oraz na podstawie testów ścinania (Tabela 6) na podstawie których wyznaczono m.in. kąt tarcia i kohezję.



Rys. 1 Rozkład wielkości ziaren [11]

Tabela 5 Rozkład wielkości ziaren [11]

Material	D ₁₀ [μm]	D ₃₀ [μm]	D ₆₀ [μm]	Cu [-]	Cc [-]
UoM-B	11.94	33.47	72.69	6.09	1.29
UoM-W	9.14	31.46	77.65	8.49	1.39
BP-1	-	-	-	10.47	2.61
GRC-1	94	160	390	4.15	0.7
GRC-3	21	75	210	10.00	1.29
JSC-1	-	-	-	7.5	1.12
JSC-1A	17	42	110	6.47	0.94
Regolith	13	34	140	10.77	0.635

Tabela 6 Parametry geotechniczne regolitów wyznaczone na podstawie testów ścinania [11]

Material	Bulk density [g/cm ³]	Relative density [%]	Peak friction angle [deg]	Cohesion [kPa]	Peak friction angle (c = 0 kPa) [deg]
UoM-B	1.5	28	31.75 ± 2.27	2.42 ± 4.17	32.62 ± 0.73
	1.7	63	33.41 ± 2.23	2.11 ± 4.09	34.14 ± 0.70
	1.9	91	34.76 ± 6.79	3.43 ± 12.45	35.99 ± 1.96
UoM-W	1.14	29	34.77 ± 2.70	Inconclusive	32.85 ± 1.13
	1.25	59	38.97 ± 0.17		35.19 ± 1.77
	1.39	92	38.06 ± 4.75		36.40 ± 1.54
BP-1	-	-	39-51	0-2.0	-
GRC-1	1.64	15.9	33.3	0	-
	1.67	27.3	33.7		
	1.75	55.9	34.0		
GRC-3	1.627	30.4	37.8	Inconclusive	-
	1.734	57.2	42.0		
	1.839	80.3	47.8		
JSC-1	-	-	45	≤1.00	-
JSC-1A	1.659	24.6	41.87	Inconclusive	-
	1.789	54.7	46.48		
Regolith	1.940	84.6	56.70		
Regolith	-	-	30-50	0.52-3.00	-

Lista dostępnych symulantów regolitu księżycowego została opublikowana w [14] – szczegóły znajdują się w Tabeli 7.

Tabela 7 Lista symulantów regolitu księżycowego [14]

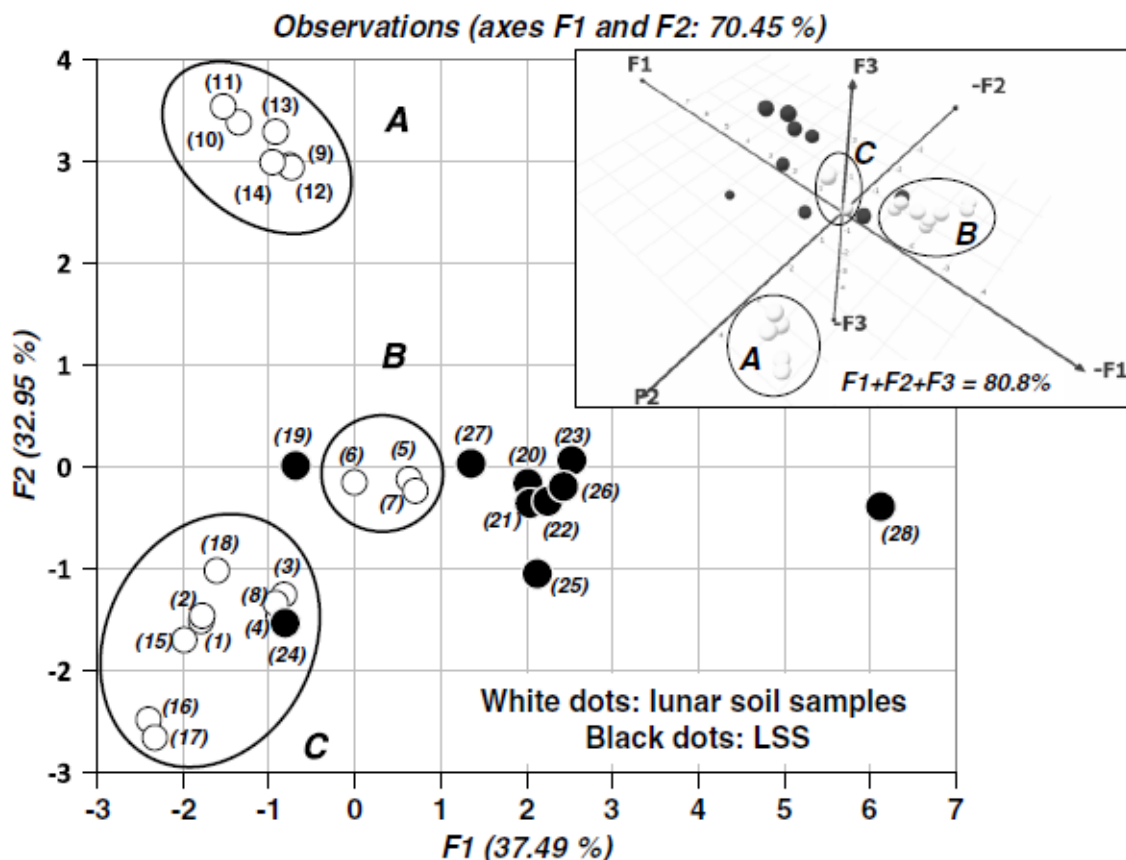
Lunar regolith simulants worldwide	Type
MLS-1* Minnesota Lunar Simulant (Weiblen et al., 1990)	High-Ilmenite mare (general use)
MLS-1P* (Weiblen et al., 1990)	High-Ti mare (exper., not in bulk)
MLS-2*	Highlands (general use)
ALS Arizona Lunar Simulant	Low-Ti Mare (geotechnical)
JSC-1* Johnson Space Center, (McKay et al., 1994)	Low-Ti mare (general use)
FJS-1 (type 1) Fuji Japanese Simulant (Kanamori et al., 1998)	Low-Ti mare
FJS-1 (type 2)	Low-Ti mare
FJS-1 (type 3)	High-Ti mare
MKS-1 MSFC	Low-Ti mare (intended use unknown)
JSC-1A, -1AF anonymous, undated, http://www.orbitec.com/store/JSC-1A-Bulk-Data-Characterization.pdf	Low-Ti mare (general use) (JSC-1A produced from same source)
OB-1 Olivine-Bytownite (Richard et al., 2007)	Highlands (general use geotechnical)
CHENOBI undocumented, see http://www.evcltd.com/index.html	Highlands (geotechnical)
CAS-1 (Zheng et al., 2008)	Low-Ti mare (general use)
GCA-1 Goddard Space Center (Taylor et al., 2008)	Low-Ti mare (geotechnical)
NU-LHT-1M & 1D NASA/USGS-Lunar Highlands Stoesser 2007	Highlands (general use)
NU-LHT-2M & 2C (Stoesser and Wilson, 2007)	Highlands (general use)
Oshima base simulant	High-Ti mare (general use)
Kohyama base simulant	Intermediate; highlands & mare
NAO-1 (Li et al., 2008)	Highlands (general use)
CLRS-1 Chinese Lunar Reg. Sim., Chinese Acad. of Sciences	Low-Ti mare (general use?)
CLRS-2 Chinese Academy of Sciences	High-Ti mare (general use?)
CUG-1 Chinese Academy of Sciences	Low-Ti mare (geotechnical)
GRC-1 & -3 Glenn Research Center	Geotech. std. vehicle mobility simulant
TJ-1 Tongji University	Low-Ti mare (geotechnical)
TJ-2	
KOHLIS-1 Koh Lunar Simulant	Low-Ti mare (geotechnical)
BP-1 Black Point, (Rahmatian and Metzger, 2010)	Low-Ti mare (geotechnical)
CSM-CL Colorado School of Mines – Colorado Lava	Geotechnical

Porównanie danych fizycznych i mechanicznych regolitu księżycowego opracowanych na podstawie Radzieckich misji księżycowych Luna oraz symulantu opracowanego w GEOKHI RAS (VI-75) pokazano w Tabeli 8 [15]

Tabel 8 Dane symulantu VI-75 [15]

Parameter	Unit	VI-75	UoM-B	GRC-3	JSC-1	Lunar soil ^a
D10	mm	0.017	0.0119	0.021	–	0.016 ^a
D30	mm	0.41	0.033	0.075	–	0.039 ^a
D60	mm	0.58	0.073	0.21	–	0.22 ^a
Coefficient of uniformity, Cu	–	34.11	6.09	10	7.5	13.75 ^a
Coefficient of curvature, Cc	–	0.17	1.29	1.29	1.12	0.43 ^a
Specific gravity, SG	–	2.56	3.52	2.633	2.9	3.01 ^b
Bulk density, ρ (min & max)	g cm ⁻³	1.5–1.93	1.37–1.97	1.52–1.94	1.33–1.8	1.36–1.8 ^b
Void ratio, e (min & max)	–	0.33–0.7	0.78–1.56	0.358–0.732	0.61–1.18	0.67–1.21 ^b
Porosity, n (min & max)	–	0.247–0.413	0.44–0.61	0.264–0.423	0.341–0.507	0.4–0.58 ^b
Peak friction angle	deg	21–46	29.5–42.8	37.8–47.8	45	37–45 ^c
Peak cohesion	kPa	0–11	2.1–12.5	0–7.2	≤1	0.75–2.1 ^c

W artykule [16] zastosowano porównano pod względem chemicznym szereg regolitów i symulantów metodą PCA. Do porównania wykorzystano dostępne dane symulantów i regolitu księżycowego (Tabela 1 w [16]). Na rys. 2 przedstawiono wyniki porównania pokazujące istotną różnicę między analogami księżycowymi a ich symulantami.



Rys. 2 Rys z pracy [16] - wykres głównych składników (współczynniki F1 i F2) z grupowaniem obiektów w przestrzeni dwuwymiarowej oraz rzutowaniem wszystkich obiektów w przestrzeni trójwymiarowej PCA (F1, F2 i F3). Klastry: A = próbki z wyżyn z Apollo 16; B = próbki z Apollo 14; oraz C = próbki mórz z Apollo 11, 12, 14 i 17.)

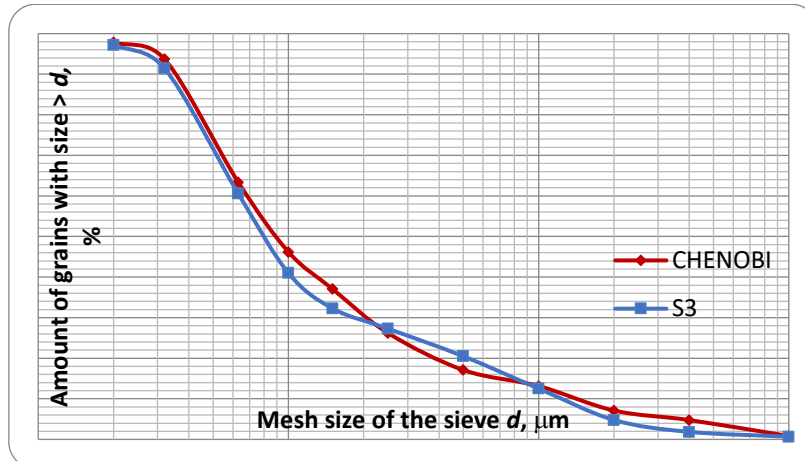
W Polsce opracowano w CBK PANa i AGH analog regolitu księżycowego AGK2010, który jest reprezentatywny pod względem geotechnicznym do regolitu księżycowego. Poniżej został przedstawione jego własności na podstawie [17] i [18]. Dla wszystkich materiałów ziarnistych pomiary wytrzymałości na ścinanie wykonywano zgodnie z normą PKN-CEN ISO/TS 17892-10:2009 w urządzeniu skrzynkowym ścinającym przy naprężeniach normalnych 100, 200, 300 i 400 kPa. Na podstawie tych pomiarów określono parametry hipotezy Coulomba (kohezję i kąt tarcia). Wyniki przedstawiono w tabeli 9

Tabela 9 Właściwości fizyczne i mechaniczne materiały stosowane w testach

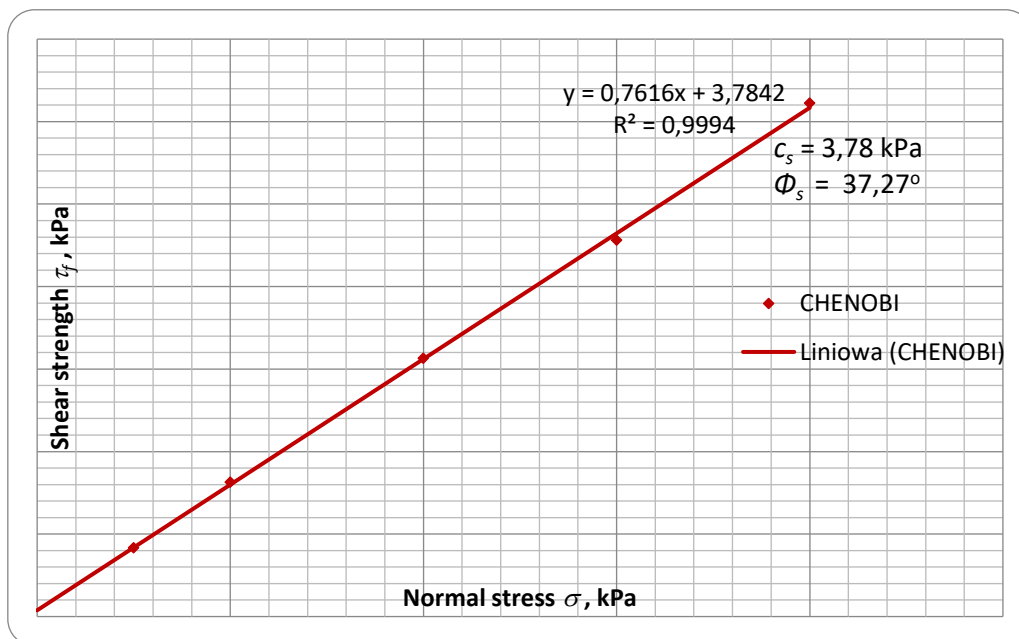
Przykładowa nazwa	Stosunek smukłości próbki	Główne naprężenie σ_3 [kPa]	Główne naprężenie σ_1 [kPa]	Kąt tarcia [stopień]	Spójność [kPa]	Wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe [MPa]
JSC 1A (producent)	-	-	-	39.35	0.54	-
JSC 1A (AGH oznacza)	-	-	-	43.44	4.30	-
Chenobi (producent)	-	-	-	37.27	3.78	-
Chenobi (AGH mias.)	-	-	-	38.47	1.18	-
AGK2010 (producent)	-	-	-	37.67	3.85	-

AGK2010 (mokre) (AGH miaz.)	-	-	-	32.58	26.10	-
AGK2010 (suche) (AGH brzmi.)	-	-	-	35.57	3.47	-

Rozkład wielkości ziaren i parametry geotechniczne (kąt tarcia i kohezja) symulantu AGK2010 w odniesieniu do symulantu Chenobi został przedstawiony na wykresach poniżej (rys. 3 i 4)



Rys. 3 Analiza sitowa analogu księżycowego CHENOBI i AGK 2010



Rys. 4 Wykres wytrzymałości ścinającej analog regolitu księżycowego CHENOBI: spójność: $c_s \approx 3,78$ kPa, oraz kąt tarcia wewnętrznego: $\phi_s \approx 37,27^\circ$

5.7 Misje kosmiczne po erze Apollo

W erze po Apollo odbyło się kilka ważnych misji, w tym lądowniki i orbityery na Księżyc, takie jak Clementine NASA (1994), Lunar Prospector NASA (1998), SMART-1 ESA (2003) oraz SELENE JAXA (2006). Jednak ostatnie misje z tego stulecia przyniosły mnóstwo danych naukowych i innych dotyczących Księżyca. Najważniejsze misje to Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) NASA, wystrzelony 18 czerwca 2009 roku; NASA Gravity Recovery and

Interior Laboratory (GRAIL), wystrzelonego 10 września 2011 roku; NASA Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer (LADEE), wystrzelona 6 września 2013 roku; oraz chińskie misje lądowików i łazików księżycowych, głównie misję Chang'e-4, która po raz pierwszy wylądowała po drugiej stronie Księżyca [25]. Najnowsze misje obejmowały chiński Chang'e-5, Korea Pathfinder Lunar Orbiter (KPLLO) oraz Chandrayaan-3 i lądownik JAXA do badania Księżyca (SLIM).

Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)

Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) NASA, wystrzelony w 2009 roku dostarczył wiele cennych danych dotyczących powierzchni Księżyca (rys. 4a). Pierwotne cele misji miały charakter eksploracyjny, a planowany czas trwania misji wynosił rok. Umieszczony na niskiej orbicie polarnej o wysokości 50 km, LRO wykonał mapowanie powierzchni Księżyca w przygotowaniu do przyszłych lądowań robotów i ludzi na Księżycu. Misja skupiona była na znajdowaniu bezpiecznych miejsc lądowania w pobliżu potencjalnych zasobów księżycowych, charakteryzowaniu środowiska promieniowania księżycowego oraz testowaniu nowych technologii. LRO dostarczył globalne dane księżycowe, które posłużyły do tworzenia map temperatur dzień i noc oraz globalną siatkę geodezyjną, obejmującą topografię i informację o ilości skał. Zapewniał także obrazowanie kolorowe o wysokiej rozdzielczości oraz dane dotyczące ultrafioletowego albedo Księżyca. Misja ta zebrała również ważne dane o biegunach księżycowych ze względu na ich unikalne warunki środowiskowe, udało się również zidentyfikować obszary ciągłego oświetlenia słonecznego i ślady wody w trwale zacienionych miejscach, gdzie temperatura może spaść do około 30 K [26]. Zestaw instrumentów LRO [27] pozwolił na zbadanie następujących własności Księżyca:

- Charakterystyka środowiska promieniowania kosmosu na orbicie księżycowej, w tym albedo (Instrument - Cosmic Ray Telescope for the Effects of Radiation (CRaTER)).
- Geodezyjna globalna topografia księżycowa na skalach odpowiednich dla miejsca lądowania (Instrument - Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA)).
- Wysokoprzestrzenne mapowanie powierzchni Księżyca na liniach Lyman-Alpha (Instrument - Lyman-Alpha Mapping Project (LAMP)).
- Mapowanie temperatury w polarnych zacienionych rejonach Księżyca (Instrument -Diviner Lunar Radiometer Experiment (DLRE)).
- Obrazowanie powierzchni Księżyca w skali formy terenu w obszarach trwale zacienionych (Instrument - PSR).
- Identyfikacja osadów lodu wodnego blisko powierzchni w polarnych regionach Księżyca (Instrumenty - Lunar Exploration Neutron Detector (LEND), LOLA, Miniature Radio Frequency (Mini-RF)).
- Ocena obiektów topograficznych w celu ułatwienia analizy bezpieczeństwa potencjalnych miejsc lądowania na Księżycu (z wykorzystaniem LOLA).
- Charakterystyka środowiska oświetleniowego w polarnych regionach Księżyca na odpowiednich skalach czasowych (Instrument - Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC)).

LRO był w stanie zbierać dane księżycowe przez dłuższy czas niż jakkolwiek inny orbiter księżycowy z ostatnich lat. Na przykład LOLA odniosła duży sukces w dokładnym mapowaniu Księżyca, co jest kluczowe dla obecnej nowej ery eksploracji Księżyca od czasu ostatniego lądowania Apollo 17 w 1972 roku. Oprócz zestawu instrumentów, LRO służył jako platforma dla innej bardzo udanej misji – Lunar Crater Observation and Sensing Satellite (LCROSS), który wykorzystał górny stopień centaur rakiety Atlas V do uderzenia w krater Cabeus. Powstały w ten sposób chmura uderzeniowa została następnie zaobserwowana i przeanalizowana z LRO [28]. Ta misja poszerzyła bazę danych wiedzy o wodzie księżycowej.



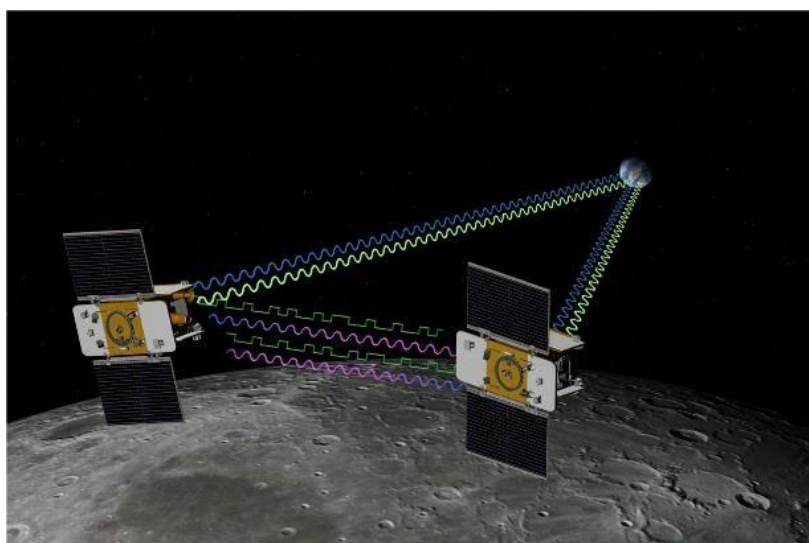
Rys. 4a Zestaw instrumentów LRO (po lewej) i LRO przechylane na stole testowym (po prawej) [29]

NASA Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL)

NASA Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL) zostało wystrzelone w 2011 roku i zakończyło misję w 2012 roku (rys. 4b). Była częścią programu Discovery Division Solar System Exploration Division. Misja GRAIL miała następujące cele [30]:

- Zmapowanie struktury skorupy i litosfery Księżyca
- Zrozumienie asymetrycznej ewolucję termicznej Księżyca.
- Określenie podpowierzchniowej struktury basenów uderzeniowych
- Ustalenie ewolucji czasowej skorupy i magmatyzmu.
- Ustalenie struktury wewnętrznej i płytów.
- Ustalenie rozmiaru możliwego wewnętrznego rdzenia.

GRAIL była misją składającą się z dwóch identycznych statków kosmicznych: GRAIL-A i GRAIL-B (odpowiednio nazwanych Ebb & Flow). Głównym celem GRAIL było zmapowanie pola grawitacyjnego Księżyca podczas orbity wokół Księżyca. Zasada misji polegała na tym, aby jeden satelita podążał za bliźniaczym satelitą, aby mierzyć ich względny ruch, gdy ich orbity były zakłócone podczas przemieszczania się przez zmiany w polu grawitacyjnym Księżyca [30]. Aby to osiągnąć, statki kosmiczne zostały wyposażone w jeden instrument naukowy, mianowicie Lunar Gravity Ranging System (LGRS), opracowany przez NASA JPL.



Rys. 4b Koncepcja artysty dotycząca sond GRAIL w ich formacji orbitalnej (nie w skali) [31]

NASA Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer

Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer (LADEE) został wystrzelony 6 września 2013 roku, a misja zakończona w 2014 roku. Misja ta miała dwa wysokopoziomowe cele naukowe [32]:

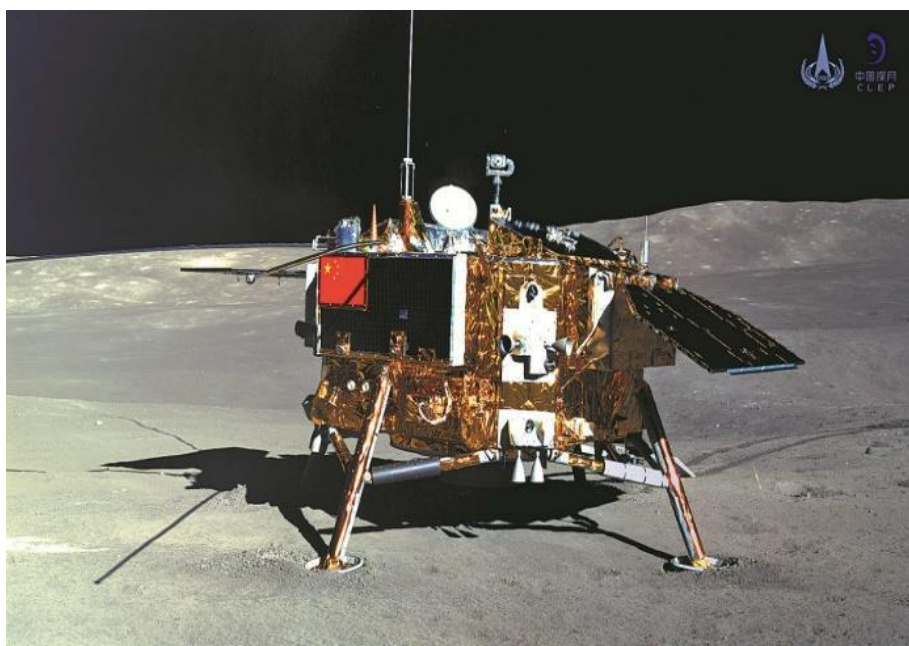
- Określenie składu atmosfery księżycowej i zbadanie procesów kontrolujących jej rozmieszczenie i zmienność,
- Scharakteryzowanie środowiska pyłu egzosferycznego Księżyca oraz zmierzenie wszelkiej zmienności śladowej atmosfery księżycowej

Badanie egzosfery Księżyca było kluczowe, ponieważ w Układzie Słonecznym istnieją inne ciała niebieskie, które prawdopodobnie mają podobne egzosfery. Ponadto LADEE zorganizowało demonstrację technologii wykorzystującej lasery optyczne (zamiast fal radiowych) do komunikacji o wysokiej prędkości. LADEE monitorowało dziesięć wariantów znanych gazów w egzosferze Księżyca, takich jak Na, K, Ar i He, odkryło inne nieznanne gazy składowe, a także badało pył egzosferyczny.

CHANG'E-4 (CE-4) oraz CHANG'E-5 (CE-5)

Chiński Chang'e-4 (CE-4) (rys. 4c) był pierwszą misją lądowika wykonaną po drugiej stronie Księżyca oraz w pobliżu krateru Von Karman w basenie Aitken (SPA) na biegunie południowym. Lądował 3 stycznia 2019 roku i wypuścił łazik Yutu-2. Skupiał się na następujących zagadnieniach:

- Prowadzenie badań astronomicznych z wykorzystaniem fal radiowych o niskiej częstotliwości, tworzenie map nieba radiowego i badanie wyrzutów mas koronalnych
- Badanie księżycowego regolitu i skorupy po przeciwnej stronie Księżyca (w pobliżu obszaru lądowania). Pierwsza próba zidentyfikowania różnicy między regolitem po bliższej i dalszej stronie Księżyca.

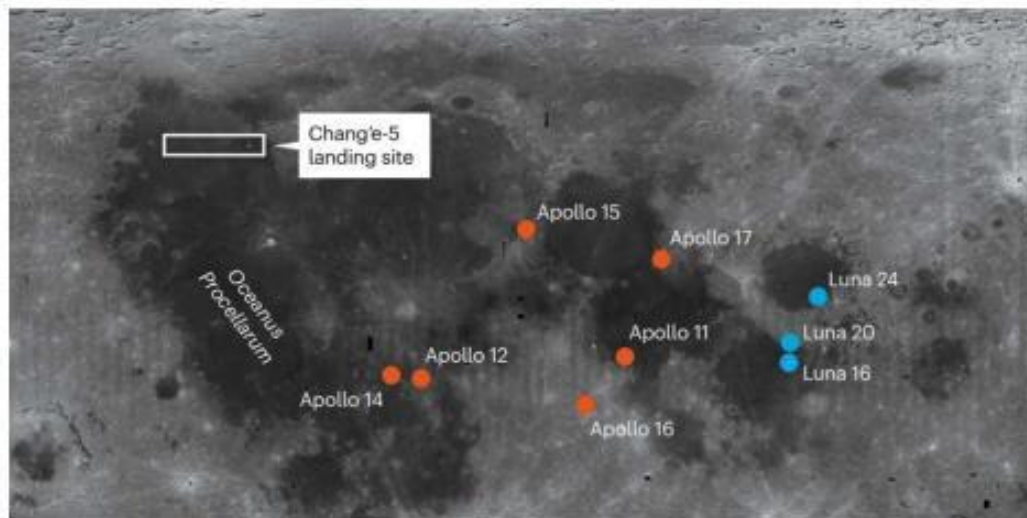


Rys. 4c Zdjęcie wykonane przez łazik Yutu 2 (Jade Rabbit-2) z 11 stycznia 2019 roku pokazuje lądowik Change's-4 [33].

Badania przeprowadzone przez łazik Yutu-2 wykazały, że różnice między skałami znalezionymi na powierzchni Księżyca po obu stronach Księżyca, a niektóre z tych skał nigdy wcześniej nie zostały odnalezione [34]. Chang'e-5 (CE-5) natomiast zapewnił dostarczenie z powierzchni Księżyca na Ziemię pierwszej chińskiej próbki regolitu księżycowego (rys. 4d). CE-5 ma dwa cele naukowe [35]:

- Dostarczenie próbek regolitu z miejsca lądowania, dostarczyć dowody do pobrania próbek oraz ustalić powiązania między danymi zebranymi na Księżycu a analizą w naziemnym laboratorium na Ziemi.
- Przeprowadzanie systematycznych i długoterminowych badań próbek regolitów księżycowych w laboratorium naziemnym, analiza struktury oraz składu fizycznego i chemicznego próbek księżycowych oraz badanie pochodzenia i ewolucji Księżyca.

CE-5 zrealizował swój cel i pobrat próbkę około 1,7 kg księżycowego regolitu. Choć ilość ta jest znacznie mniejsza niż próbki zebrane przez misje Apollo i Luna (około 382 kg), dostarczyła nowych informacji na temat regolitów, których wcześniej nie udało się uzyskać [34].



Rys. 4d Obszar lądowania misji CE-5, Apollo i Luna [35]

KOREA PATHFINDER LUNAR ORBITER (KPLO)

Południowokoreańska misja, Korea Pathfinder Lunar Orbiter (KPLO), jest kolejnym przykładem misji księżycowej. Został wystrzelony 4 sierpnia 2022 roku przez Koreański Instytut Badań Kosmicznych (KARI). Była to bardzo udana misja, osiągająca znaczące rezultaty dzięki ładunkowi instrumentów naukowych, w tym dwóch instrumentów dostarczających nowe, wysokiej jakości obrazy powierzchni Księżyca [36]:

- Lunar Terrain Imager (LUTI) – do dostarczania obrazów miejsc lądowania o wysokiej rozdzielczości przestrzennej (<5 m).
- ShadowCam NASA – kamera o wysokiej czułości do mapowania odbicia dla trwale zacienionych obszarów powierzchni Księżyca (poszukująca osadów lodu wodnego).

CHANDRAYAAN-3

Chandrayaan 3 jest kontynuacją indyjskiej serii misji księżycowych Chandrayaan. Został wystrzelony 14 lipca 2023 roku, a pomyślnie wylądował na Księżycu 25 sierpnia 2023 roku. Był to pierwszy lądownik, który wylądował w pobliżu południowego bieguna Księżyca. 22 września 2023 roku lądownik nie powrócił do aktywności po nocy księżycowej i misja została zatrzymana [37].

6 Analiza kompetencji i potencjału w Polsce

W kontekście badań związanych z geotechniką księżycową zidentyfikowane zostały następujące kompetencje na rynku polskim:

Badania naukowe nad parametrami geotechnicznymi regolitów księżycowych:

- CBK PAN – projekt Moon harvesting z NCN
- AGH - projekt Moon harvesting z NCN
- UWM - projekt Moon harvesting z NCN
- Politechnika Gdańska, Politechnika Wroclawska

Budowa urządzeń przeznaczonych do pracy na powierzchni Księżyca:

- CBK PAN – projekt DIGGER, projekt PACKMOON, projekt PETER-PFC udział w misjach kosmicznych (m.in. Rosetta, Insight, Phobos Grunt)
- Astronika – project Galago, project Compactor, Udział w misji kosmicznej InSight
- PIAP Space – project DISTANT, GALEON, MANUS
- AGH – Wydział Wiertnictwa Nafty i Gazu – projekt Wiertnicy

Detekcja potencjalnych złóż:

- ING PAN – projekt Mirrores

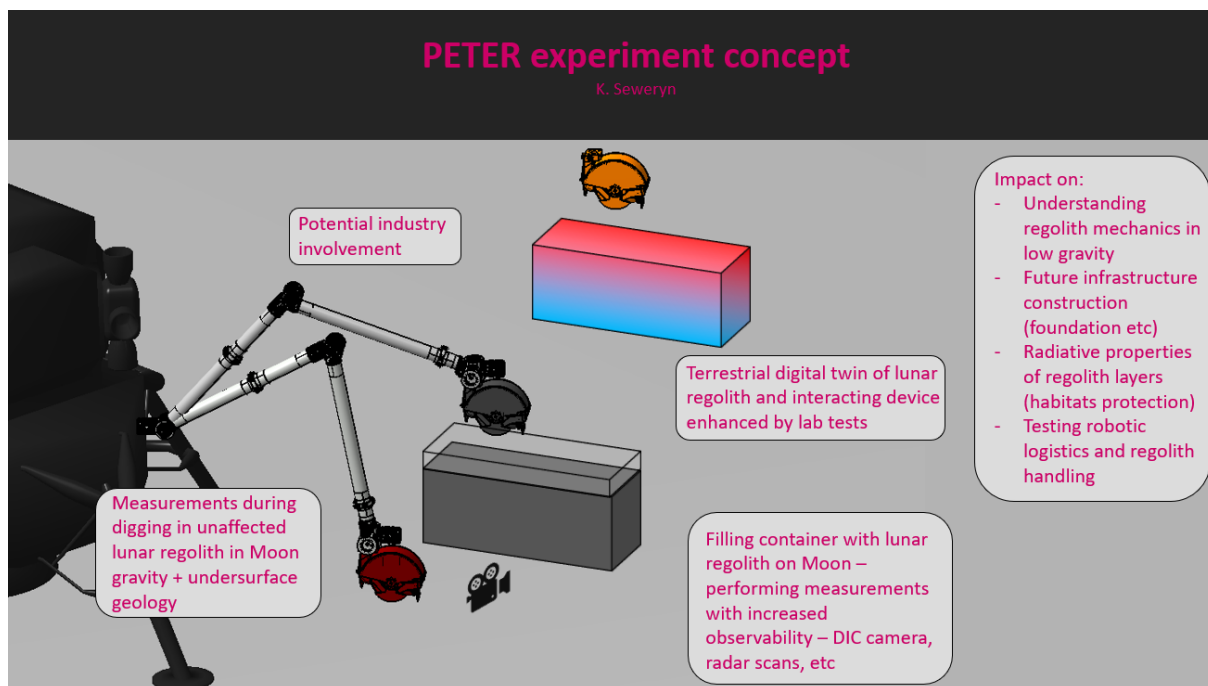
Czynniki środowiskowe:

- Politechnika Łódzka – napyłanie powłok przeznaczonych do środowiska księżycowego
- IMP PAN – elektrostatyczność regolitu
- AGH Wydział Technologii Kosmicznych – projekt budowy brudnej komory próżniowej

7 Propozycja eksperymentu naukowego

Propozycja eksperymentu naukowego PETER wynika z: braku dostatecznie dobrych danych pomiarowych (podsumowanie w sekcji 5) zebranych z wykorzystaniem aktualnie dostępnych urządzeń badawczych oraz możliwości nowoczesnych systemów pomiarowych. Propozycja eksperymentu naukowego PETER została przedstawiona na rys. 5 i ma następujące cechy:

- Wyznaczenie parametrów geotechnicznych regolitu księżycowego opiera się o wyznaczenie parametrów geotechnicznych regolitu z modelu Mori – Ishigami opisującego ruch urządzenia RCE w regolicie księżycowym [19]
- Eksperyment wykonywany jest w: (i) regolicie księżycowym w jego naturalnej postaci (rozkład ziaren, grawitacja, gęstość względna) w określonych miejscach Księżyca podczas procesu kopania urządzeniem RCE, (ii) w kontenerze do którego regolit zostanie przesypany urządzeniem RCE (rozkład ziaren i grawitacja jest zachowana) – pomiar w kontenerze ze szklaną ścianą boczną umożliwi szereg pomiarów bazujących na technikach pomiaru wizyjnego ruchu cząstek regolitu w wyniku oddziaływania z RCE, (iii) eksperyment bazujący na bliźniaku cyfrowym eksperymentu w kontenerze
- Dodatkowe możliwości wynikające z realizacji eksperymentu podstawowego: (i) pomiar składu mineralogicznego i chemicznego w otworze powstałym w wyniku procesu kopania regolitu i ich korelacja z pomiarami orbitalnymi, (ii) testy manipulatorów realizujących zadania na powierzchni księżyca



Rys. 5 Propozycja eksperymentu naukowego PETER.

Poza pomiarami własności geotechnicznych regolitu przedstawiony eksperyment naukowy będzie miał wpływ na następujące aktywności księżycowe: lepsze zrozumienie procesu fundamentowania infrastruktury księżycowej, zrozumienie własności ochronnych regolitu (ochrona przed promieniowaniem).

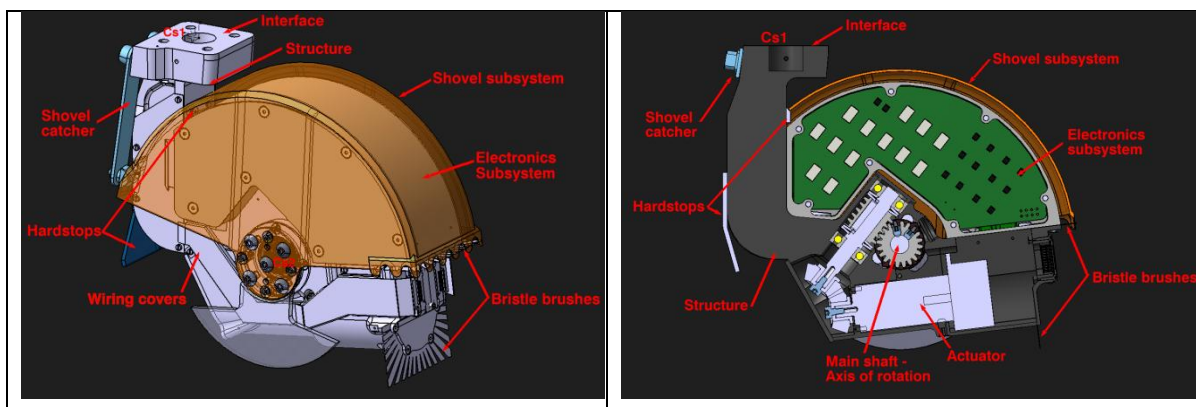
Kluczowym elementem zaplanowanego eksperymentu jest urządzenie do pobierania regolitu RCE, którego model inżynierski (EM) powstał w ramach realizacji projektów: (i) DIGGER finansowanego przez ESA, PETER PFC – lot paraboliczny – finansowany przez ESA i CN. Poniższy opis bazuje na pracy [20] i [21].

RCE to elektromechaniczne urządzenie o jednym stopniu swobody (DoF), pracujące z niską i stałą prędkością, którego główną funkcją jest pobieranie próbek regolitu księżycowego. Wybór koncepcji opierał się na dwustopniowej analizie porównawczej. W pierwszym etapie wybrano cztery koncepcje: Oscillating Corer Device (OCD), Bucket Drum (BD), Rotary Hammering Device (RHD) [22] oraz RCE, które zostały przeanalizowane pod kątem kluczowych wymagań, takich jak:

- Wydajność kopania i obsługi podczas pozyskiwania regolitu do głębokości 20 cm. Obejmuje to masę pobranej próbki (2 kg przy wielokrotnym pozyskiwaniu), czas pojedynczego pobrania i odrzucenia <10 min., zatrzymanie próbki podczas transportu,
- działanie w wysoce kohezynym i abrazyjnym regolicie księżycowym,
- limit sił reakcji pionowej, który nie powinien przekraczać 20 N,
- działanie z kątem natarcia w zakresie od 50° do 90° (pozycja pionowa),
- Oczekiwana eksploatacja w warunkach środowiskowych Księżyca (głównie zakres temperatur: -100°C do +105°C i wysoka próżnia),
- masa urządzenia nie powinna przekraczać 3 kg, a zużycie energii powinno być średnio niższe niż 10 W.

Na podstawie przeglądu literatury rozwiązań naziemnych, spełnienia kluczowych wymagań oraz punktów z jakościowych i ilościowych kryteriów oceny, RCE został wybrany do dalszego procesu projektowania. W drugiej analizie porównano rozmieszczenie układu napędowego głównie pod kątem przetrwania obciążeń startowych oraz topologii silników i przekładni. Ostateczny model CAD urządzenia RCE przedstawiono na rysunku 6 i składa się z następujących podsystemów:

- podsystem elektroniczny (zawierające sterownik, piny, złącza itp.),
- podsystem łopaty (łopata z wałem głównym),
- Podsystem konstrukcyjny (obudowa z główną belką, pokrywami, szczotkami),
- podsystem napędu (silnik, skrzynia biegów, koła zębate itp.),
- Podsystemy kontroli termicznej (grzejniki, czujniki temperatury).



Rys. 6. Główne podsystemy i komponenty RCE w widoku izometrycznym (po lewej) oraz w przekroju (po prawej).

Ogólne wymiary systemu to 144 x 172 x 60 mm. Proponowany system został zoptymalizowany pod kątem kilku czynników, takich jak:

- miniaturyzacja oraz niezawodna i odporna na zapylenie mechanika,
- właściwe zachowanie tribologiczne w odniesieniu do wysokich temperatur i próżni,
- geometria łopaty maksymalizuje możliwości kopania,
- elektronika sterownika.

W rezultacie wybrano trójstopniowy układ napędowy, który składa się z: na pierwszym stopniu płaski silnik ECX 32 HT Maxon oraz GPX22UP 111:1 przekładnia planetarna dostosowana do warunków próżniowych, na drugim stopniu przekładnia kątowa KHK 1:1 (moduł 1) z kątem wału 45°, a na trzecim stopniu 20: 1 KHK przekładnia ślimakowa. Całkowity stosunek wynosi więc 2220:1. Wał skośny i wał główny są podparte przez łożyska kątowe SKF smarowane suchym MoS₂ (Ti, W) [23]. Łożyska na wale głównym są uszczelnione filcem. Ze względu na silnie zintegrowaną topologię układu napędowego, w systemie nie ma sprzęgła. Jednak aby złagodzić potencjalne naprężenia termiczne, ślimak ma elastyczność w poruszaniu się wzdłuż wału skośnego. Czujnika Halla do wykrywania pozycji końców łopaty są zintegrowane z przekładnią ślimakową na wałku głównym. Łopata została zaprojektowana tak, aby zakryć cały mechanizm, zapewniając maksymalną możliwą powierzchnię i tym samym maksymalizując możliwości kopania. Ma kształt cylindra o średnicy 166 mm, co pozwala na głębokość około 40 mm pojedynczego pobrania próbki. Wykonana jest ze stopu tytanu, aby zmniejszyć masę, a do niego zamontowano przeciwwagi ze stopu wolframu, aby centralizować środek ciężkości (CoG) blisko osi obrotu. Zęby łopaty zostały zaprojektowane zgodnie z wytycznymi górniczymi – konkretnie zęby mają nieco większą grubość, aby zmniejszyć potrzebę kompresji regolitu wewnątrz łopaty. Łopata jest wyposażona w czujnik RF [24] do szacowania masy zebranego regolitu. Belka główna to pojedynczy element ze stopu tytanu, który wytrzymuje ładunki startowe bez potrzeby mechanizmu zwalniającego z mocowania. Utrzymuje układ napędowy na właściwym miejscu, minimalizuje naprężenia termiczne i mieści moduł elektroniczny potrzebny do sterowania silnikiem. Moduł elektroniczny podzielony jest na dwie części: sterownik umieszczony w RCE oraz sterownik planowany do umieszczenia na lądowisku lub łaziku. Sterownik został opracowany przez DRI Solutions i jest dedykowanym silnikiem BLDC/PMSM przeznaczonym do zastosowań księżycowych. System sterowania i regulacji opiera się na mikrokontrolerze ARM i wykorzystuje algorytm sterowania zorientowanego na pole (FOC). FOC generuje napięcie trójfazowe jako wektor do sterowania prądem w trójfazowym stojanie.

Po integracji prototypu RCE (rys. 7) urządzenie RCE przeszło szeroko zakrojoną kampanię testową w ramach działań DIGGER, zgodnie z planem testów przygotowanym do potwierdzenia TRL 6. Wyniki kampanii zostały starannie udokumentowane w odpowiednich raportach testowych. Głównym celem było potwierdzenie wydajności RCE w różnych symulowanych warunkach księżycowych, w tym w różnych terenach i czynnikach środowiskowych, a także zapewnienie trwałości i funkcjonalności urządzenia w przygotowaniu do rzeczywistych misji.

Podczas rozwoju RCE przeprowadzono kluczowe testy środowiskowe, sprawdzając drgania, integralność strukturalną oraz właściwości termiczne. RCE przeszedł także serię testów drgań symulujących warunki startu i lądowania. Pomimo zastosowania profilu obciążenia z wycięciem, urządzenie przetrwało znaczne przeciążenia. Sugeruje to, że RCE może wytrzymać standardowe obciążenia misji. Z termicznego punktu widzenia RCE radził sobie znakomicie, nie zaobserwowano znaczącego wzrostu temperatury silnika podczas pracy. Ten wynik rozwiązuje jedno z kluczowych zagrożeń związanych z przegrzewaniem silnika w warunkach próżni. W testach inspekcji sprawdzano także masę urządzenia i zużycie energii. Zmierzona wartość masy wynosiła 1,91 kg, a średnie zużycie energii równało się 7 W. Wartości te mieściły się w oczekiwanym zakresie i zazwyczaj pozostawały poniżej limitów określonych przez ESA. Szczegóły testów środowiskowych przeprowadzonych dla modelu RCE EM można znaleźć w [20].



Rys. 7. Model inżynierski (RCE EM).

Podczas testów potwierdzono wymaganą głębokość kopania. Jak pokazano na Rysunku 8, udało się osiągnąć głębokość 30 cm, co jest kluczowe dla misji wykopalisk księżycowych. Kształt łopaty i powierzchnia RCE zostały prawidłowo zaprojektowane, co umożliwiło efektywne kopanie i pobieranie regolitu. Wyniki te potwierdzają, że urządzenie może skutecznie działać w oczekiwanych warunkach księżycowych.

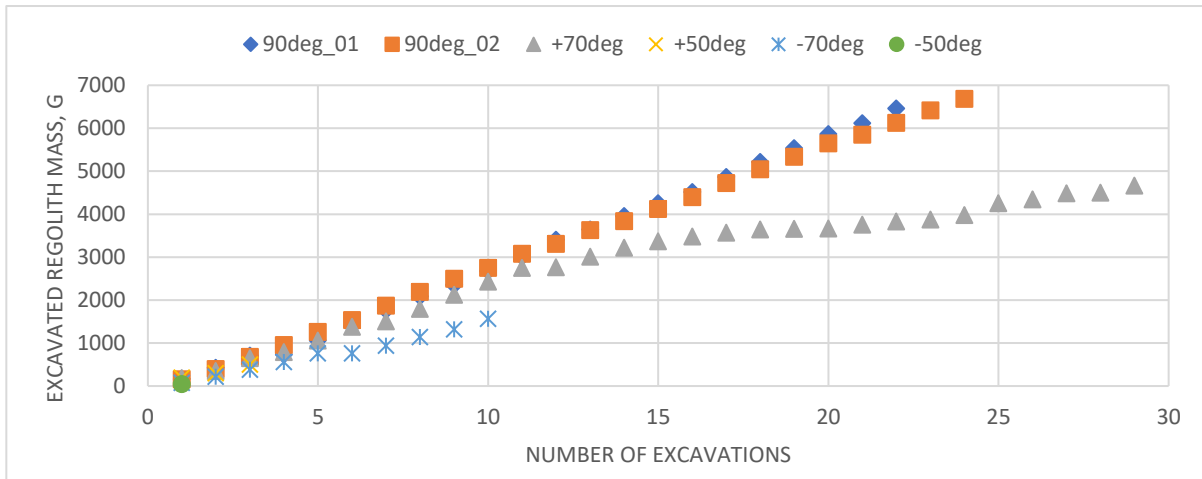
Test w brudnej komorze próżniowej (DTVAC) został przeprowadzony, aby ocenić działanie RCE w symulowanych warunkach kosmicznych, ze szczególnym uwzględnieniem niskiego ciśnienia i wysokiej temperatury. Test przeprowadzono przy ciśnieniu 10^{-1} mbar. Łącznie przeprowadzono cztery serie pozyskiwania regolitów: pierwsza przy temperaturze bazowej 20°C, a następnie trzy testy przy podwyższonej temperaturze 85°C.

Na początku każdego testu RCE umieszczano w DTVAC, a pod nim umieszczono pojemnik z przygotowanym regolitem. Następnie komora została zamknięta, a przez godzinę powstała próżnia. W testach przeprowadzanych w temperaturze 85°C, ta sama godzina pozwoliła RCE stopniowo osiągnąć docelową temperaturę za pomocą grzejników. Po osiągnięciu odpowiednich poziomów temperatury i próżni, RCE wykonało pobranie regolitu. Po

każdym pobraniu próbki DTVAC był zapowietrzany, a komora otwierana do inspekcji i analizy. Zdjęcie DTVAC z RCE pokazano na rysunku 9.

Wyniki wykazały minimalne różnice między wykopaliskami regolitowymi wykonywanymi w warunkach próżni a tymi prowadzonymi w standardowych warunkach laboratoryjnych, szczególnie w początkowych kilku centymetrach. Sugeruje to, że RCE działa wydajnie w warunkach próżni, bez istotnych odchyień w wydajności. Chociaż testy DTVAC wykazały wszechstronność i niezawodność RCE, kolejne eksperymenty w wysokiej próżni pomogą udoskonalić jego wydajność i zapewnić odporność w jeszcze bardziej ekstremalnych warunkach.

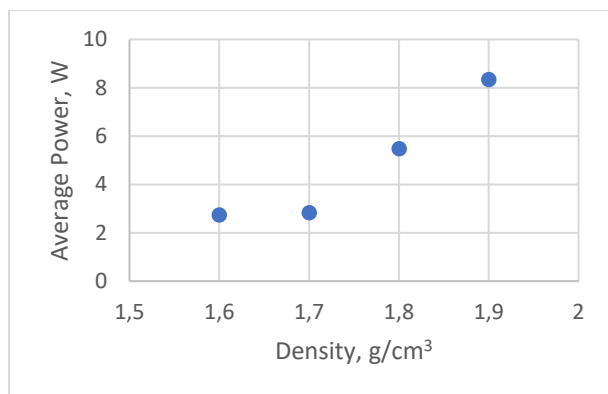
Istotnym wynikiem testów był wpływ gęstości regolitu na wydajność RCE. Dla regolitu AGK2010 o gęstości 1,9 g/cm³, zużycie energii gwałtownie wzrosło, co pokazano na rysunku 10. Ten wynik podkreśla znaczenie projektowania RCE do obsługi szerokiego zakresu gęstości regolitów, ponieważ różnice gęstości mogą znacząco wpływać na efektywność energetyczną i skuteczność operacyjną.



Rysunek 8 RCE podczas kopania (górny rząd). Skumulowana masa wykopanego regolitu pod kilkoma kątami natarcia (dół) – kąt natarcia 90° oznacza pionową pozycję interfejsu RCE podczas kopania.



Rysunek 9 Zdjęcia DTVAC (po lewej) z RCE przed (prawy górny bok) i po (prawej) pojedynczym regolitem. W dolnym wierszu przedstawiono cztery zdjęcia z procesu kopania.



Rysunek 10. Zużycie energii podczas procesu wykopowego jako funkcja gęstości pobranego regolitu.

Kampanie testowe z RCE w scenariuszach z mieszanką regolitów i kamyków, a także regolitem z osadzonymi większymi skałami, zostały pomyślnie zakończone. Podczas testów siły i momenty obrotowe działające na RCE mieściły się w wymaganych specyfikacjach, a średnie zużycie energii również mieściło się w dopuszczalnych granicach 10W. Sporadyczne skoki zużycia energii przekraczające 20W były odnotowane, głównie z powodu wysokiej oporności ze strony skał osadzonych w regolicie, co tymczasowo zwiększało zapotrzebowanie na energię. Podczas procesu kruszenia generowano zauważalny hałas, a zużycie energii wzrosło do około 50W. Pomimo tych wyzwań, RCE działało skutecznie w tym mieszanym środowisku materiałowym.

Na podstawie wyników testów opisanych powyżej określono wartości kryteria wydajności RCE (Tabeli 10). Ogólnie rzecz biorąc, RCE spełniło lub przewyższyło oczekiwania pod względem wydajności kopania, pokazując

zdolność do osiągnięcia pożądanej głębokości przy zachowaniu efektywności. Niska masa i zużycie energii przez urządzenie oferują znaczące zalety, ponieważ pozostawiają przestrzeń na dalszy rozwój i optymalizację. Wyniki te sugerują, że istnieje wiele możliwości integracji dodatkowych funkcji lub czujników bez istotnego wpływu na ogólną wydajność.

Tabela 10. Wydajność RCE EM.

Kryteria	Res.	Kryteria	Res.
Tempo wykopów, kg/h	14.6	Głębokość jednego pojedynczego cięcia (pojedyncza próbka), mm	14.9
Maksymalna masa pojedynczej próbki, kg	0.43	Maksymalny zasięg koparki, mm	310
Czas pozyskania pojedynczej próbki, sekunda	47.4	Liczba operacji potrzebnych do osiągnięcia wymaganej głębokości	24
Zużycie energii Wh/kg	0.57	Masa układu, kg	1.91
Zużycie energii na pojedynczą próbkę, Wh/próbka	0.07	Obciążenia zakłócające i siły wykopowe, N	17.8

8 Plan rozwoju technologii / ścieżka TRL

Eksperyment PETER składa się z szeregu podsystemów. Jego główny składnik to urządzenie do pobierania próbek RCE. Urządzenie RCE ma udokumentowaną przez ESA poziom gotowości technologicznej TRL6. Jego komputer sterujący oraz czujnik ilości pobranego regolitu ma TRL4. Ponadto system może składać się z: (i) deploymentu (manipulatora) – bazując na informacjach z Astroniki i PIAPS tego typu systemu są na poziomie TRL 4/5, (ii) spektrometrów do pomiarów mineralogicznych i chemicznych – rozwiązania były analizowane zarówno w Polsce (projekt spektrometru w CBK PAN oraz projekt Mirrores jak również w Open University i University of Bern.

Plan rozwoju eksperymentu PETER składa się czterech ścieżek równoległych:

- a) Podnoszenia TRL komponentów – sensor masy, komputer sterujący do TRL 6
- b) Podnoszenia TRL całego instrumentu do TRL 6 – testy wraz z manipulatorem (strategia kopania) i sensorami pomiarowymi
- c) Testów RCE na ISS – potwierdzenie automatycznej pracy w warunkach obniżonej grawitacji
- d) Podnoszenia TRL w kierunku TRL 7/8 poprzez udział w jednej z planowanych misji np. Argonaut, ISRU Demo mission, Japońskich misji księżycowych czy misji Endurance (JPL)

9 Możliwości współpracy międzynarodowej

Możliwa współpraca międzynarodowa wynika z możliwości udziału w planowanych misjach kosmicznych. Planowanych jest kilka misji, w których urządzenie RCE mogłoby być wykorzystane zarówno do: (i) do wsparcia działań technicznych, takich jak obsługa regolitów, lub (ii) do wsparcia zadań naukowych, w których regolit jest potrzebny. Poniżej kilka wybranych:

Argonaut, czyli Europejski lądownik (EL3), to klasa lądowników księżycowych zaprojektowanych przez Europejską Agencję Kosmiczną we współpracy z Airbusem w celu dostarczania ładunków na powierzchnię Księżyca. Lądownik jest projektowany z myślą o wszechstronnym zestawie zastosowań, w tym jako elektrownia, wsparcie dla łazika, dostawę ładunków oraz infrastrukturę. Planowany jest start na rakiecie nośnej Ariane 6.

Endurance to koncepcja misji NASA JPL dla łazika dalekiego zasięgu (zdolnego do pokonania prawie 2000 km), zaprojektowanego do eksploracji, a ostatecznie zbierania, przechowywania i zwracania 12 próbek z basenu Biegun–Aitken (SPA) po drugiej stronie Księżyca. SPA jest największym i najstarszym (niekwestionowanym)

basenem uderzeniowym na Księżycu, który zawiera kluczowe odpowiedzi na temat chronologii Układu Słonecznego oraz ewolucji planet. Planowana data startu na czas trwania to 2030 rok (na podstawie najwcześniejszej dostępności RTG). Lądowanie na Księżycu: Wykonane przez lądownik NASA Commercial Lunar Payload Service (CLPS).

ISRU DEOM mission ESA obecnie przygotowuje misję na powierzchnię Księżyca, aby zademonstrować technologie niezbędne do umożliwienia wykorzystania zasobów in-situ (ISRU) na Księżycu. Celem tej misji ISRU jest pokazanie, że do 2025 roku produkcja wody lub tlenu na Księżycu jest wykonalna. Tlen prawdopodobnie będzie pierwszym zasobem produkowanym lokalnie i wykorzystywanym do wspierania misji ludzkich. Mogłoby znaleźć zastosowanie w systemach podtrzymywania życia i być wykorzystywane razem z wodorem jako paliwo do systemów napędowych i zasilających. Opracowano różne procesy i techniki do pozyskiwania chemicznie związanego tlenu z księżycowego regolitu, warstwy pyłu pokrywającej teren księżycowy. Inne produkty tych procesów to metale i stopy, które mogą być ostatecznie wykorzystywane do produkcji.

Lunar Polar Exploration Mission (LUPEX) (nazywana również Chandrayaan-5) to planowana wspólna misja księżycowa ISRO i JAXA. Misja ta wyśle bezzałogowy lądownik księżycowy i łazik w celu zbadania regionu bieguna południowego Księżyca nie wcześniej niż w 2028 roku. Przewiduje się zbadanie regionów stale zacienionych i określenie ilości i jakości wody na Księżycu. JAXA dostarczy pojazd startowy H3, łazik księżycowy o masie 350 kg wraz z instrumentami, a ISRO dostarczy lądownik i kilka instrumentów łazika.

Eksperymenty na ISS

Międzynarodowa Stacja Kosmiczna (ISS) z modułem ESA Columbus, który orbituje na LEO, była kluczową platformą do prowadzenia badań naukowych w mikrograwitacji. ISS gościła liczne eksperymenty z różnych dziedzin, w tym biologii, fizyki i nauki o materiałach. Unikalne środowisko mikrograwitacyjne ISS pozwala badaczom badać zjawiska niemożliwe do zaobserwowania na Ziemi, takich jak zachowanie płynów, płomieni i systemów biologicznych. Co więcej, lokalizacja LEO czyni ją idealną lokalizacją dla misji eksploracji kosmosu. Stosunkowo niewielka odległość od Ziemi oraz łatwa komunikacja z naziemną kontrolą czynią LEO atrakcyjnym miejscem do testowania nowych technologii i prowadzenia badań naukowych. LEO to ważny krok na drodze do dalszej eksploracji Księżyca i innych miejsc w głębokiej przestrzeni kosmicznej. W 2023 roku ESA oraz Polska Agencja Kosmiczna (POLSA) poszukiwały propozycji od polskich podmiotów (akademickich i/lub przemysłowych) dotyczących działań, w tym rozwoju. Proponowane pomysły powinny być ukierunkowane na działania naukowe, demonstracje technologii i/lub działania edukacyjne. Nasz zespół złożył propozycję, jednak nie została ona zaakceptowana ze względu na stosunkowo dużą masę (20 kg) i brak udowodnionego działania systemu. Ta sytuacja uległa zmianie po realizacji eksperymentu w locie parabolicznym – PETER – PFC.

Możliwa współpraca międzynarodowa dotyczy również poszczególnych dostawców instrumentów lub urządzeń. Firma Leonardo dysponuje manipulatorem planetarnym STA opracowanym dla środowiska marsjańskiego. Manipulator ten jest rozważany dla misji Argonaut. Uniwersytety tj. Open University oraz University of Bern dysponują dobrze rozwiniętymi spektrometrami, które mogłyby być wykorzystywane do pomiarów geologicznych w otworach wykopanych przez RCE.

10 Analiza ryzyk i barier

Analiza ryzyk jest trudna do przygotowania bez znajomości szczegółów misji księżycowej. Poniżej wyszczególniono kilka ryzyk o charakterze technologicznym i organizacyjnym.

a) Ryzyka technologiczne

- Głównie wynikają z niepełnej znajomości środowiska księżycowego. W szczególności elektrostatyczności regolitu księżycowego, wysokich i niskich temperatur pracy oraz próżni.
- Kolejna grupa ryzyk technologicznych wynika z utrudnionej pełnej automatyzacji procesów wydobywczych nawet w środowisku ziemskim. Wynika to głównie nieterminowości zachowania regolitu. Np. możliwość zakleszczenia urządzeń po natrafieniu na kamień/skałę o określonej wielkości.

- Istnieją również ryzyka związane interoperacyjnością urządzeń – np. działanie RCE wymaga określonego sposobu pozycjonowania i orientacji względem powierzchni wydobywanej – nie kończenie musi to być spójne z możliwościami układu manipulującego
- b) Ryzyka organizacyjne
- Kopanie na Księżycu jest ambitnym zadaniem na arenie europejskiej – wygrywanie ambitnych projektów wymaga współdziałania na różnych szczeblach administracji. Mając na uwadze krótki staż Polski w ESA niesie to za sobą ryzyko nie wygrania dyskusji na forum ESA
 - Ryzykiem jest również potrzeba stabilnego finansowania przez kilka lat przygotowań do misji.

11 Rekomendacje strategiczne

Poniżej przygotowane zostały rekomendacje działań umożliwiających realizację eksperymentu PETER w perspektywie 5 lat:

- Realizacja wspólnego projektu z firmą przemysłową posiadającą/planującą realizację deploymentu/manipulatora na jednej z planowanych misji księżycowych. Celem projektu mogłoby być opracowanie strategii pracy urządzenia RCE na manipulatorze. Projekt ESA.
 - Realizacja projektu podniesienia TRL wybranych podsystemów RCE do TRL6. Projekt ESA.
 - Realizacja projektu naukowego konsolidującego wysiłki naukowe. Projekt NCN lub ERC.
 - Realizacja projektu typu „field testing” np. w komorach próżniowych w ESA ESRIC, w ziemskich obszarach okołobiegunowych, lub na ISS
- Realizacja projektu budowy bliźniak cyfrowego procesu kopania z wykorzystaniem RCE opartego o modele DEM.
- Aktywny udział administracji rządowej w planowaniu i realizacji misji Argonaut
 - Aktywny udział administracji rządowej w planowaniu i realizacji innych (nie ESA) misji Księżycowych

12 Podsumowanie

Niniejsza ekspertyza zawiera propozycję eksperymentu PETER. Bazuje ona na analizie stanu wiedzy i określeniu luki w realizowanych badaniach kosmicznych. Bazuje ona również na dotychczasowych osiągnięciach naukowych i technologicznych CBK PAN oraz możliwościach technologicznych sektora przemysłowego w Polsce. Koncepcja eksperymentu została przedstawiona na rysunku 5. W dużej mierze jest ona oparta na pozytywnych wynikach realizacji projektu DIGGER dla ESA.

13 Bibliografia i źródła

- [1] Carpenter, J., Fisackerly, R., Houdou, B., (2016), Establishing lunar resource viability, *Space Policy*, 37, 52–57
- [2] Blair, B. R., Diaz, J., Duke M. B., (2002), *Space Resource Economic Analysis Toolkit: The Case for Commercial Lunar Ice Mining*, Final Report to the NASA Exploration Team
- [3] Linne, D., L., et al., (2017, September 25–29), Overview of NASA Technology Development for In-Situ Resource Utilization (ISRU) [Conference paper], 68th International Astronautical Congress, Adelaide, Australia
- [4] Linne, D., L., et al., (2019, June 11–14), Current NASA In Situ Resource Utilization (ISRU) Strategic Vision [Conference paper], Space Resources Roundtable Planetary & Terrestrial Mining and Sciences Symposium, Illinois, USA
- [5] Marta E. Wachowicz, Zarządzanie transferem technologii kosmicznych,– Wydanie I. – Warszawa, 2020
- [6] Przylibski, T., (2022), *Górnictwo pozaziemskie w Polsce*, Przegład Górniczy
- [7] Seweryn K., Kolusz A., Świca I., Tkacz A., Gallina A., Katzer J., Kobaka J., Konecny P. and Młynarczyk P. (2024) A Conceptual Open Pit Mine Architecture for the Moon Environment. *Artificial Satellites*, Vol.59 (Issue 1), pp. 11-41. <https://doi.org/10.2478/arsa-2024-0002>
- [8] International Space Exploration Coordination Group, (2018), *The Global Exploration Roadmap*, ISECG
- [9] International Space Exploration Coordination Group, (2020), *The Global Exploration Roadmap - Supplement August 2020: Lunar Surface Exploration Scenario Update*, ISECG
- [10] European Space Agency, (2021), *Terrae Novae 2030+ Strategy Roadmap*, ESA
- [11] G.H. Just, K.H. Joy, M.J. Roy, K.L. Smith, Geotechnical characterisation of two new low-fidelity lunar regolith analogues (UoM-B and UoM-W) for use in large-scale engineering experiments, *Acta Astronautica*, Volume 173, 2020, Pages 414-424.
- [12] D.B. Stoesser, D.L. Rickman, S. Wilson, Design and Specifications for the Highland Regolith Prototype Simulant NU-LHT-1m and -2M, (2010) NASA/TM-2010-216438.
- [13] Heiken, G., H., Vaniman, D., T., French, B., M., (1991), *Lunar Sourcebook*, Cambridge University Press
- [14] Taylor, L. A., Pieters, C. M., Britt, D.; Evaluations of lunar regolith simulants; *Planetary and Space Science* 126 (2016) pp. 1–7.
- [15] E.N. Slyuta, E.A. Grishakina, V. Yu Makovchuk, I.A. Agapkin, Lunar soil-analogue VI-75 for large-scale experiments, *Acta Astronautica*, Volume 187, 2021, Pages 447-457,
- [16] Zarzycki P.K. Katzer J., Multivariate Comparison of Lunar Soil Simulants; *Journal of Aerospace Engineering*, Volume 32 Issue 5, 2019.
- [17] Seweryn K., Skocki K., Banaszkiwicz M., Grygorczuk J., Kolano M., Kuciński T., Mazurek J., Morawski M., Biątek A., Rickman H., Wawrzaszek R., Określanie właściwości geotechnicznych regolitów planetarnych za pomocą Low Velocity Penetrometers, *Planetary and Space Sciences*, tom 99 s. 70-83, 2014
- [18] Bednarz S., Rzyczniak M., Gonet A., Seweryn K.; Badania nad analogiem formowanego księżycowego regholitu AGK-2010; *Arch. Min. Sci.*, tom 58 (2013), nr 2, s. 551–556
- [19] Rybus T., Tkacz A., Seweryn K., Modified Mori-Ishigami model for estimating forces acting on the Rotary Clamshell Excavator during lunar regolith sampling, *Acta Astronautica*, Volume 240, 2026, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2025.12.027>.
- [20] K. Seweryn, et al.; Performance of lunar regolith sampling device RCE subject to key lunar environmental factors, I-Sairas conference (2024).
- [21] K. Seweryn, et al.; Rotary Clamshell Excavator: Loose Regolith Sampling Device Dedicated to Lunar Environment, ASTRA conference (2025).

- [22] K. Seweryn, The new concept of sampling device driven by rotary hammering actions, IEEE/ASME TMECH, Vol 21(5) (2016). DOI:10.1109/TMECH.2016.2547640
- [23] M. Makówka, K. Seweryn, P. Osica, MoS₂(Ti, W) coatings as surface modification of friction pairs operating in space and dusty lunar atmosphere, ESMATS conference (2023).
- [24] K. Kurek, K. Seweryn, A. Tkacz, Detection of the lunar regolith acquired by excavator using RF sensor, Sensors, 25, 751 (2025). <https://doi.org/10.3390/s25030751>
- [25] Jablonski, A.M. and Man, K.F., 2021., "Impact of Recent Lunar Missions on the Understanding of Lunar Environment", Proc. of the ASCE Earth and Space Conference 2021
- [26] NASA, 2023. NASA's Moon to Mars Strategy and Objectives Development – A blueprint for sustained human presence and exploration throughout the Solar System, NASA HQ, Washington DC 20546. Accessed April 2023. NASA Details Strategy behind Blueprint for Moon to Mars Exploration.
- [27] Keller, J. W., and Petro, N. E., 2018. "The Cornerstone Mission: A Third Extension of the Lunar Reconnaissance Orbiter". Proc. of the 48th Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands, Texas.
- [28] Hoover, R., Jones, N. N., & Braukus, M., 2010. "NASA Missions Uncover the Moon's Buried Treasures". NASA HQ, October 21, 2010. Accessed July 2018. <https://www.nasa.gov/centers/ames/news/releases/2010/10-89AR.html>
- [29] NASA, 2009a. NASA Godard Space Flight Center, Accessed on August 28, 2025. <https://svs.gsfc.nasa.gov/10408/>.
- [30] Zuber, M. T. et al., 2013a. "Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL)". Space Science Reviews, 178, pp. 3-24.
- [31] NASA, 2012. Agle, D., & McCall, C. NASA's GRAIL Moon Twins Begin Extended Mission Science, August 31, 2012, Accessed July 2018 https://www.nasa.gov/mission_pages/grail/news/grail20120831.html
- [32] Colaprete, A., Vargo, K., Shirley, M., Landis, D., Wooden, D., Karcz, J., Hermalyn, B., and Cook, A., 2014. "An Overview of the LADEE Ultraviolet Visible Spectrometer, Space Science Reviews, 185 (1-4), pp. 63-91.
- [33] China Daily. 2020. "China to launch Chang'e-5 lunar probe this year". China Daily.com.cn Accessed October 24, 2023, from China to launch Chang'e-5 lunar probe this year - Chinadaily.com.cn
- [34] Li, C. et al., 2019. "Chang'E-4 Initial Spectroscopic Identification of Lunar Far-Side Mantle- Derived Materials". Nature, Vol. 569 (7756), pp. 378-382.
- [35] Zhou, C. et al. 2022. "Scientific Objectives and Payloads of the Lunar Sample Return Mission – Chang'e-5, Advances in Space Research 69, pp.823-883l
- [36] KARI, 2023. "Korea's first step toward lunar exploration". Accessed October 26, 2023, home > R&D > Lunar Exploration > Korea's first step toward lunar exploration) (kari.re.kr).
- [37] ISRO, 2023. "Chandrayaan-3", Indian Space Research Organization (ISRO), Bangalore, India, https://www.isro.gov.in/Chandrayaan3_New.html.