

MIRORES: Spektrometry kosmiczne MIR/FIR do poszukiwań geologicznych na Księżycu i Ziemi

Jakub Cieżala

MIRORES Mining Data Services Ltd., Wrocław

Instytut Nauk Geologicznych Polskiej Akademii Nauk, Wrocław Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk, Warszawa

j.ciezala@mirores.eu

Jarosław Bąkała

MIRORES Mining Data Services Ltd., Wrocław

Instytut Nauk Geologicznych Polskiej Akademii Nauk, Wrocław Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk, Warszawa

Mirosław Kowaliński

MIRORES Mining Data Services Ltd., Wrocław

Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk, Warszawa

Natalia Zalewska

MIRORES Mining Data Services Ltd., Wrocław

SCentrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk, Warszawa

Marta Cieżala

MIRORES Mining Data Services Ltd., Wrocław

Instytut Nauk Geologicznych Polskiej Akademii Nauk, Wrocław Warszawskiego, Warszawa

Ireneusz Badura

Wydział Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu

Warszawskiego, Warszawa

Streszczenie: MIRORES to kompaktowy spektrometr średniej podczerwieni (MIR) do dalekiej podczerwieni (FIR) przeznaczony do poszukiwań geologicznych na Księżycu i Ziemi. Obejmuje zakres 6–20 μm (opcjonalnie rozszerzany do $\sim 45 \mu\text{m}$) przy rozdzielczości spektralnej $\sim 0,5 \mu\text{m}$, umożliwiając wykrywanie sygnałów mineralnych (np. fosforanów, tlenków) niewidocznych dla czujników widzialnych/bliskiej podczerwieni. Matryca płaszczyzny ogniskowej 256×320 (z 16 wąskopasmowymi kanałami po 20 rzędów każdy) i dwa dodatkowe detektory apatytu i ilmenitu, w połączeniu z lekkim systemem optycznym, zapewniają wysoką wydajność zarówno w zastosowaniach księżycowych, jak i ziemskich. Próby terenowe i plany integracji wykazują gotowość techniczną i strategiczne dostosowanie do inicjatyw dotyczących zasobów kosmicznych.

Słowa kluczowe: Spektroskopia w podczerwieni; Teledetekcja; Geologia rud; Zasoby kosmiczne

Wprowadzenie

Postępy w dziedzinie teledetekcji w zakresie średniej podczerwieni otwierają nowe możliwości w zakresie poszukiwania minerałów na powierzchniach planet. Zakres długości fal 6–45 μm zawiera diagnostyczne pasma drgań lodu wodnego i wielu minerałów (tlenków, siarczków i fosforanów), które nie są wykrywalne w widmie widzialnym i krótkofalowym podczerwieni (VNIR/SWIR) wykorzystywanym w większości poprzednich misji. Na przykład księżycowy minerał apatyt (fosforan wapnia) ma silne pasmo absorpcyjne w pobliżu 17–18 μm , a ilmenit (tlenek żelaza i tytanu) wykazuje pasmo około 19 μm . Sygnatury te znajdują się poza zasięgiem instrumentów takich jak Moon Mineralogy Mapper NASA (który działał w zakresie $<3 \mu\text{m}$). Są one tylko częściowo pokryte przez radiometr Diviner sondy Lunar Reconnaissance Orbiter, który ma trzy z czterech kanałów IR skupionych w pobliżu 8 μm [1]. W rezultacie kluczowe zasoby, takie jak fosfor i pierwiastki ziem rzadkich w apatycie oraz tlen

i hel-3 w ilmenicie, pozostają trudne do wykrycia za pomocą tradycyjnych czujników VNIR/SWIR. MIRORES został wybrany jako główny ładunek naukowy dla przyszłej misji orbiterów księżycowych (Lunar Mineralogy Mapper, opracowywany przez ESA), której start zaplanowano na 2029 r. Misja ta będzie pierwszym zastosowaniem spektrometru dalekiej podczerwieni wokół Księżyca, a MIRORES stanie się tym samym pionierem w dziedzinie mapowania zasobów księżycowych z kosmosu.

Instrument MIRORES (Mid-/Far-Infrared ORE Spectrometer) został zaprojektowany, aby wypełnić tę lukę. Pierwotnie opracowany do wykrywania rud siarczkowych na Marsie w zakresie 20–30 μm FIR, MIRORES został przeprojektowany, aby skupić się na zakresie 6–20 μm MIR (z rozszerzeniem do $\sim 45 \mu\text{m}$), który obejmuje zasoby księżycowe o wysokim priorytecie, zachowując jednocześnie kompaktowe rozmiary i wykonałość. Zmiana ta wynika z faktu, że apatyt i ilmenit można zidentyfikować w zakresie ~ 6 –20 μm , więc rozszerzenie zakresu poza 20 μm nie jest niezbędne

do osiągnięcia tych celów. Dzięki zawężeniu zakresu spektralnego, MIRORES osiąga wyższą rozdzielczość spektralną w kluczowym oknie 6–14 μm , umożliwiając jednoznaczną identyfikację minerałów na tle krzemianów. Niewiele instrumentów kosmicznych badało ten region MIR dla ciał pozbawionych atmosfery, częściowo ze względu na nieprzezroczystość atmosfery ziemskiej poniżej $\sim 8 \mu\text{m}$ [1]. Warto zauważyć, że czujnik Advanced Himawari Imager (AHI) japońskiego satelity meteorologicznego Himawari-8 wykazał ostatnio wartość obserwacji Księżyca w zakresie 6–14 μm [1], potwierdzając, że dane spektralne w średniej podczerwieni mogą ujawnić różnice w składzie powierzchni zgodne z wynikami badań Divinera [2, 3]. Podobnie, teleskop powietrzny SOFIA należący do NASA wykrył wodę molekularną na oświetlonej słońcem powierzchni Księżyca przy 6 μm [4], co jest niemożliwe w przypadku obserwatoriów naziemnych ze względu na absorpcję atmosferyczną. Postępy te podkreślają potencjał naukowy i eksploracyjny dedykowanego spektro-

metru MIR.

MIRORES został zaprojektowany, aby wykorzystać ten potencjał zarówno w kontekście księżycowym, jak i w zastosowaniach naziemnych. Instrument łączy w sobie dostosowany zakres spektralny z detektorem o wysokiej czułości i zminiaturyzowaną optyką, aby pełnić podwójną rolę: latać w misjach księżycowych w celu mapowania minerałów zawierających zasoby oraz działać na dronach na Ziemi w celu badania celów wydobywczych. W kolejnych sekcjach szczegółowo opisujemy podwójne zastosowanie MIRORES jako instrumentu księżycowego i do zastosowań ziemskich. Po tych dwóch sekcjach następuje opis projektu inżynierskiego, wyniki wstępnych testów terenowych oraz droga do wdrożenia w gospodarce zasobami kosmicznymi.

Przykłady zastosowań księżycowych i ziemskich

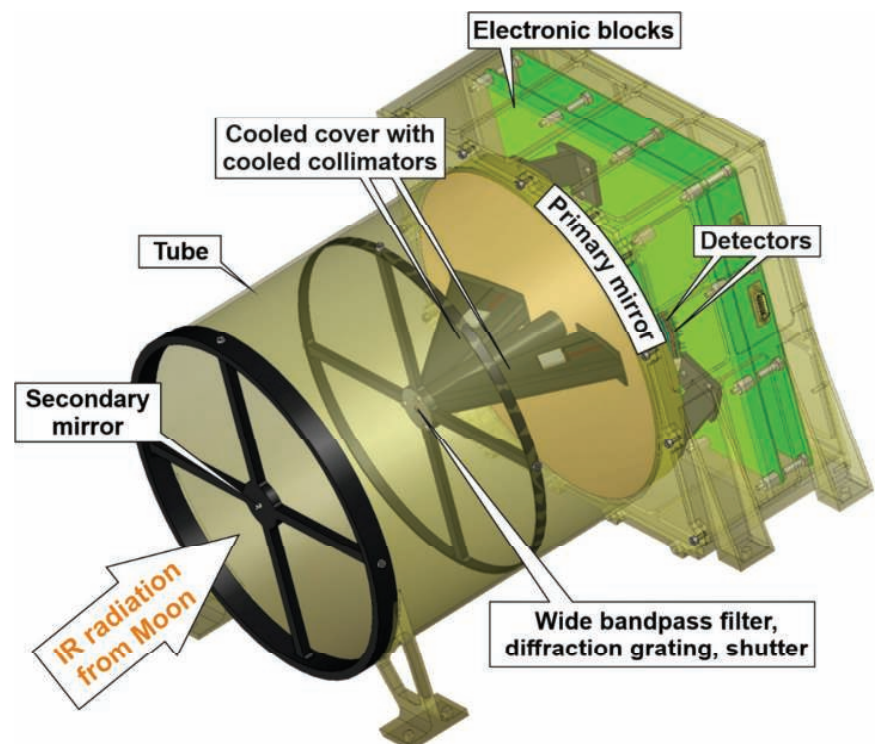
Obecny impuls dla programu MIRORES wynika z celów związanych z poszukiwaniem zasobów księżycowych. Globalne agencje kosmiczne podkreślają potrzebę zlokalizowania i oszacowania zasobów księżycowych, takich jak lód wodny, minerały zawierające tlen, metale i inne substancje lotne, jako podstawy zrównoważonej gospodarki kosmicznej w układzie Ziemia-Księżyc (tzw. gospodarka cis-księżycowa) [5]. W rzeczywistości strategia Europejskiej Agencji Kosmicznej dotycząca zasobów kosmicznych wymaga przeprowadzenia „pomiarów na Księżycu” do 2030 r. w celu ustalenia potencjału materiałów księżycowych i poinformowania o ich wykorzystaniu w architekturze eksploracyjnej [6]. Spośród tych materiałów szczególnie ważne są apatyt księżycowy i ilmenit. Apatyt ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F/Cl/OH}$) nie tylko zawiera fosfor, który ma kluczowe znaczenie dla nawozów, ale może również zawierać hydroksyl lub wodę w swojej strukturze.

Ponadto ma tendencję do koncentrowania pierwiastków ziem rzadkich. Ilmenit (FeTiO_3) jest ceniony jako źródło żelaza i tytanu, a co ważne, może dostarczać tlen i hel-3 w wyniku przetwarzania chemicznego, co czyni go

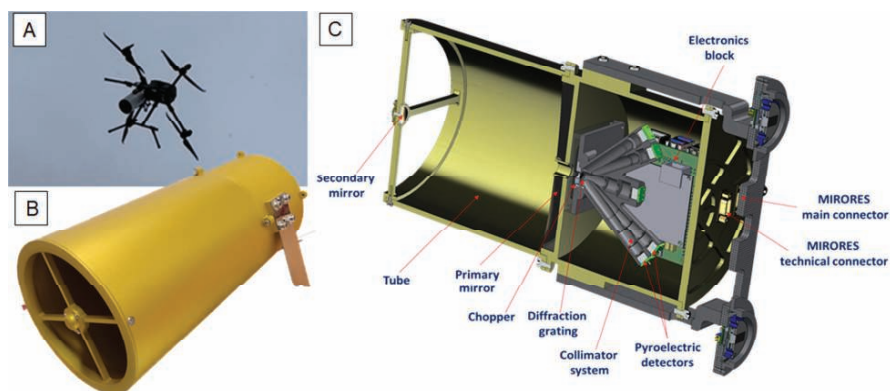
kluczowym składnikiem regolitu dla przyszłej produkcji tlenu i helu-3 w ramach ISRU (wykorzystania zasobów na miejscu). W 2025 r. firma Interlune ogłosiła zawarcie pierwszej tego rodzaju umowy z Programem Izotopowym Departamentu Energii Stanów Zjednoczonych na zakup 3 litrów helu-3 pochodzącego z Księżyca do 2029 r. oraz równoległą umowę przemysłową, na mocy której Bluefors może kupować do 10 000 litrów helu-3 rocznie w latach 2028–2037, co wskazuje na pojawienie się wczesnego rynku komercyjnego dla tego izotopu (interlune.space). Zidentyfikowanie bogatych złóż tych minerałów na Księżycu bezpośrednio wsparłoby plany dotyczące załogowych baz księżycowych i wytwarzania paliwa. Jednak tradycyjne urządzenia do obrazowania orbitalnego, takie jak Moon Mineralogy Mapper (M3), które działają w zakresie 0,4–3 μm , a nawet urządzenia do mapowania termicznego, takie jak Diviner (~7,5–23 μm), mają ograniczoną zdolność do precyzyjnego lokalizowania apatytu lub ilmenitu. Charakterystyczne pasma wibracyjne tych minerałów znajdują się poza dotychczas mierzonym zakresem lub mieszczą się w grubych, nakładających się kanałach [1]. Dlatego też do dokładnego mapowania tych zasobów potrzebny

jest specjalistyczny spektrometr, taki jak MIRORES.

Chociaż projekt MIRORES powstał jako projekt skupiający się na Księżycu, został on opracowany z myślą również o zastosowaniach na Ziemi. Zakres długości fal spektrometru pokrywa się z oknem atmosferycznym promieniowania podczerwonego ($\sim 8\text{--}14\text{ }\mu\text{m}$), które jest wyjątkowo przydatne do geologicznego teledetekcji na Ziemi [7]. W tym zakresie podczerwieni termicznej promieniowanie emitowane przez skały niesie ze sobą charakterystyczne dla poszczególnych minerałów sygnatury, które mogą uzupełniać spektroskopię światła odbitego (VNIR/SWIR) [8]. Na przykład skały bogate w kwarc, węglany, minerały ilaste i siarczany wykazują unikalne pasma reststrahlen lub cechy Christiansena w zakresie 8–14 μm . Pasma Reststrahlenu powstają w wyniku silnej absorpcji drgań podstawowych (np. w wiązańach Si–O lub C–O). Cechy Christiansena odpowiadają lokalnym minimom emisyjności w pobliżu długości fal, przy których rzeczywista część współczynnika załamania światła materiału zbliża się do współczynnika załamania światła otaczającego medium [7,8]. Cechy te umożliwiają tworzenie map litologicznych, co jest trudne do osiągnięcia przy krótszych długościach



1. Schemat instrumentu MIRORES Moon (średnica 30 cm). Przerysowano z [12]



2. (A) Spektrometr MIRORES przystosowany do montażu na dronie (apertura 13 cm). (B) Urządzenie MIRORES o średnicy 15 cm przeznaczone do stosowania nad tałsmami przenośnikowymi lub jako urządzenie ręczne. (C) Schemat techniczny tego samego urządzenia o średnicy 15 cm do zastosowań przemysłowych/ręcznych

fal [1]. Czujniki powietrzne i satelitarne (np. instrumenty ASTER i HyTES należące do NASA) wykorzystują to okno do mapowania mineralogii powierzchni Ziemi, korzystając z wysokiej transmisji w przedziale 8–12 μm [7]. Jednak absorpcja przez parę wodną w atmosferze poważnie utrudnia obserwacje w zakresie spektralnym 6–8 μm z ziemi lub orbity [1]. W tym przypadku urządzenie MIRORES, zainstalowane na nisko latającym dronie lub na miejscu, mogłoby bezpośrednio mierzyć widma skał w zakresie 6–20 μm przy minimalnych zakłóceniach atmosferycznych. Wykorzystanie dronów otwiera możliwości poszukiwania minerałów w odległych regionach: MIRORES zamontowany na bezałogowym statku powietrznym mógłby skanować złoża rud fosforano-

wych (bogate w apatyt) lub piaski tytanowe (bogate w ilmenit), które cieszą się rosnącym zainteresowaniem gospodarczym. Międzynarodowa Agencja Energetyczna prognozuje trzykrotny do siedmiokrotnego wzrost popytu na pierwiastki ziem rzadkich do 2040 r. w związku z rozwojem technologii czystej energii [9] oraz równoległy wzrost popytu na minerały wykorzystywane w bateriach i ogniwach fotowoltaicznych [9]. Opracowanie przenośnych spektrometrów MIR do szybkiego rozpoznania takich kluczowych minerałów może pomóc w zaspokojeniu tego popytu. Zasadniczo to samo narzędzie spektralne, które bada zasoby na księżycowych wyżynach, mogłoby badać suche tereny na Ziemi w poszukiwaniu nowych złóż minerałów. W ten spo-

sób następuje bezpośredni transfer technologii z eksploracji kosmosu do przemysłu ziemskiego. Przyszłe misje na Księżyc są również postrzegane zarówno jako poligon doświadczalny dla zrównoważonej eksploracji, jak i motor korzyści gospodarczych na Ziemi dzięki wiedzy o zasobach Księżyca [5]. MIRORES wpisuje się w tę wizję, zapewniając namacalną, podwójną funkcjonalność: spektrometr, który będzie służył misjom księżycowym, a następnie sektorom górniczym i geologicznym na Ziemi.

Inżynieria spektralna: kompaktowa i wydajna

Projektowanie spektrometru obrazowego do poszukiwań geologicznych w zakresie średniej i dalekiej podczerwieni stanowi wyzwanie pod względem czułości, rozdzielczości i rozmiarów. MIRORES rozwiązuje te problemy dzięki specjalnie zaprojektowanej matrycy detektora i układowi optycznemu, które zapewniają równowagę między wydajnością a kompaktowością. Jego rdzeniem będzie dwuwymiarowa matryca płaszczyzny ogniskowej (FPA) o rozdzielczości 256 × 320 pikseli, złożona z dwóch matryc, każda o rozdzielczości 256 × 160 pikseli. Te dwie matryce z tellurku rtęciowo-kadmowego (HgCdTe) są chłodzone kriogenicznie i zoptymalizowane odpowiednio dla

Tab. 1. Kluczowe parametry spektrometru MIRORES w konfiguracji księżycowej i UAV

Parametr	Wartość	Konfiguracja / uwagi
Konfiguracja księżycowa		
Zakres spektralny (nominalny)	6–20 μm (MIR), z możliwością rozszerzenia do ~45 μm	Ciągłe 6–14 μm na FPA; konstrukcja zoptymalizowana dla MIR
Rozdzielczość spektralna	~0,5 μm	Dla kanałów wąskopasmowych na matrycy płaszczyzny ogniskowej
Liczba kanałów spektralnych	≥16 wąskich pasm na FPA + 2 pasma dyskretne (17,5, 19 μm)	16 kanałów z filtrem interferencyjnym + detektory piroelektryczne apatytowe/ilmenitowe
Matryca detektorów	256 × 320 pikseli (2 × 256 × 160 matryc HgCdTe)	Zoptymalizowana dla 6–10 μm i 10–14 μm ; $D^* \geq 10^{10}$ Jones
Teleskop	2-lustrzany Cassegrain, lustro główne 30 cm	Składana konstrukcja; mieści się w obudowie mikrosatelity
Pole widzenia	~10	Do swobodnego próbkowania przestrzennego w konfiguracji orbity księżycowej
Próbkowanie przestrzenne (orbita księżycowa)	~100 m/piksel	Przeznaczony do mapowania Księżyca w skali zasobów
Masa instrumentu	<10 kg	Kompletny instrument kosmiczny (z wyłączeniem platformy statku kosmicznego)
Temperatury detektora/optyki	Detektory 50–100 K; przestrzeń między siatką a detektorem ~190 K; optyka ~0 °C	Osiągnięte dzięki miniaturowemu chłodzarkowi kriogenicznemu i stabilizacji termicznej
Wydajność radiometryczna	Dokładność radiometryczna lepsza niż 5 %	Kalibracja pokładowa z pomiarami referencyjnymi/czarnego ciała
Konfiguracja bezałogowego statku powietrznego		
Masa	<3 kg	Urządzenie MIRORES zamontowane na dronie
Zużycie energii	~10 W	Kompatybilny ze średniej wielkości bezałogowymi statkami powietrznymi (np. DJI Matrice 350)
Typowa geometria pomiarowa	Wysokość lotu 50–100 m; zasięg kilkudziesięciu hektarów	Niska wysokość lotu w celu zminimalizowania absorpcji atmosferycznej

pasem fal 6–10 μm i 10–14 μm , oferując wysoką czułość właściwą ($D^* \geq 10^{10}$ Jones). MIRORES wykorzystuje matryce 2D, dzieląc je na podmatryce spektralne: wymiar 160 pikseli wysokości w obu matrycach (łącznie 320 pikseli wysokości) jest koncepcyjnie podzielony na 16 pasków po 20 linii każdy, umożliwiając przechwytywanie 16 różnych pasm długości fal. W praktyce multipleksowanie to osiąga się za pomocą dyskretnych filtrów interferencyjnych, które rozkładają różne części widma na wyznaczone rzędy detektorów. Wdrożenie MIRORES przewiduje około 20 rzędów detektorów na kanał spektralny, aby zapewnić wystarczającą integrację sygnału. Dzięki temu instrument może jednocześnie mierzyć co najmniej 16 wąskich pasm w zakresie 6–14 μm bez ruchomych części, co stanowi znaczną zaletę przy mapowaniu określonych odcisków palców minerałów. Rozdzielczość spektralna wynosi około 0,5 μm . Aby rozdzielić sąsiednie cechy, takie jak pasma 17,5 μm i 19 μm , konstrukcja zawiera siatkę dyfrakcyjną, która kieruje te długości fal do detektorów piroelektrycznych, zwiększając całkowitą liczbę kanałów spektralnych do 18.

MIRORES wykorzystuje konstrukcję teleskopu Cassegraina z dwoma zwierciadłami, która jest złożona do niewielkich rozmiarów. W pierwotnej konstrukcji przewidzianej do obserwacji Marsa średnica zwierciadła głównego i ogniskowa zostały dobrane tak, aby uzyskać rozdzielczość naziemną wynoszącą około 10–20 m/piksel z orbity [10]. W przypadku mapowania Księżyca wymagania zostały złagodzone do rozdzielczości przestrzennej około 100 m/piksel (ponieważ nacisk kładziony jest na identyfikację obszarów bogatych w zasoby na dużą skalę). To złagodzenie wymagań pozwala na uzyskanie szerszego pola widzenia około 10° bez zwiększania rozmiarów optyki (zgodnie z ograniczeniami ESA) lub konieczności wprowadzania znaczących zmian w konstrukcji teleskopu lub układzie chłodzenia. Lustro główne ma średnicę 30 cm (wystarczającą do zbierania światła średniej i dalekiej podczerwieni w całym polu widzenia), a masa całego instrumentu wynosi poniżej 10 kg (rys. 1),

co mieści się w parametrach mikrosatelity [11]. Połowa światła z lustra wtórnego teleskopu przechodzi przez aperaturę bezpośrednio do systemu filtrów, który dzieli widmo na wyznaczone segmenty detektora. Dodatkowa siatka dyfrakcyjna dla drugiej połowy światła dyfrakcjonuje fale o długości 17,5 i 19 μm do detektorów piroelektrycznych dla apatytu i ilmenitu. Ta sama siatka dyfrakcyjna może również służyć do dyfrakcji światła do opcjonalnych detektorów siarczków o właściwościach spektralnych między 24 a 39 μm [10, 11] oraz do detektorów lodu wodnego około 43 μm [12], w przypadku przyjętych wersji spektrometru MIRORES do poszukiwania siarczków na Ziemi lub lodu wodnego na Księżycu. W każdym przypadku zostanie zastosowany filtr przepuszczający fale długie, aby odciąć fale o długości poniżej 6 μm i zapewnić niezmienną temperaturę w MIR/FIR.

Kontrola termiczna ma kluczowe znaczenie dla instrumentów działających w zakresie średniej i dalekiej podczerwieni. Miniaturowy chłodziarka kriogeniczna (np. TC2570) będzie chłodzić detektory MIRORES umieszczone w przestrzeni kosmicznej, aby utrzymać niską temperaturę wymaganą do uzyskania niskiego poziomu szumów. Optyka zostanie ustabilizowana termicznie w pobliżu 0°C , aby zapobiec odkształceniom mechanicznym. Natomiast detektory półprzewodnikowe muszą być schłodzone do temperatury 50–100 K, a przestrzeń między siatką dyfrakcyjną a detektorami jest utrzymywana w temperaturze około 190 K. W obecnym projekcie nowoczesne chłodzone detektory fotoniczne (HgCdTe) oferują znacznie lepszą czułość, dlatego zostały zastosowane pomimo konieczności chłodzenia kriogenicznego. Układy elektroniczne zawierają zintegrowane wzmacniacze dla każdego kanału detektora oraz wielokanałowy odczyt do obsługi 81 920 pikseli (256×320) z prędkością wideo. Dane mogą być przetwarzane na pokładzie w celu przekształcenia surowych sygnałów w skalibrowaną promieniowanie spektralne dla każdego pasma. Kalibracja spektralna wykorzystuje obserwacje referencyjne i znane źródła ciała dosko-

nale czarnego; zgodnie z wymaganiami misji dąży się do osiągnięcia dokładności radiometrycznej lepszej niż 5%.

Testy terenowe i integracja naziemna

Aby wypełnić lukę między projektem a wdrożeniem, MIRORES przechodzi stopniowe testy w warunkach laboratoryjnych i terenowych. Wstępna walidacja skupiała się na jego podstawowej funkcji: rozróżnianiu sygnatur mineralnych w mieszanych scenach. W laboratorium sproszkowane próbki minerałów (np. apatyt, ilmenit, pirit) są analizowane za pomocą różnych spektrometrów IR w celu wygenerowania widm referencyjnych i symulacji odpowiedzi pasmowych MIRORES. Symulacje oparte na tych pomiarach potwierdziły, że pasma ilmenitu i pirytu można wykryć nawet wtedy, gdy minerały te stanowią zaledwie około 10% mieszanki proszkowej z krzemianami, biorąc pod uwagę rozdzielczość spektralną i stosunek sygnału do szumu MIRORES [10, 11]. Badania takie zwiększają pewność, że instrument wykryje minerały rudne na tle regolitu [10, 11]. Wreszcie, prototyp MIRORES jest wykorzystywany do pozyskiwania widm średniej i dalekiej podczerwieni tych samych próbek, potwierdzając, że pasma diagnostyczne zidentyfikowane w symulacjach są obserwowalne za pomocą samego instrumentu.

Równolegle z testami statycznymi zespół rozpoczął integrację MIRORES z dronem (rys. 2A). Niewielka masa (<3 kg) i zużycie energii (10 W) MIRORES sprawiają, że możliwe jest latanie średniej wielkości dronem, takim jak DJI Matrice 350, w celu przeprowadzenia badań na obszarze kilkudziesięciu hektarów. MIRORES może latać nad wychodniami skalnymi i kopalniami odkrywkowymi zawierającymi różne minerały rudne. Przewiduje się tryb skanowania autonomicznego, w którym dron przesuwając pole widzenia spektrometru po siatce, tworząc mapę spektralną absorpcji. Chociaż warunki atmosferyczne wpływają na wykrywanie w zakresie średniej i dalekiej podczerwieni z platformy powietrznej, loty na niskiej wysokości

(50–100 m) w suchych warunkach mogą zminimalizować absorpcję przez parę wodną. Ponadto pasma powyżej $\sim 12 \mu\text{m}$ (np. 17–20 μm) można częściowo skorygować za pomocą wbudowanych w drona czujników wilgotności atmosferycznej. MIRORES jest również dostosowywany do zastosowań stacjonarnych (np. skanowanie rudy na przenośnikach taśmowych w kopalniach), a nawet jako ręczny analizator minerałów (rys. 2B i 2C).

Wyniki trwających testów stanowią wskazówki do wprowadzenia ostatecznych poprawek technicznych. Na przykład, jeśli okaże się, że silne wibracje gruntu mają wpływ na detektor, można zastosować dodatkowe mocowania tłumiące. Kolejne kroki będą polegały na zwiększeniu autonomii i wytrzymałości prototypu. W celu długoterminowego zastosowania w terenie, potencjalnie w kopalniach lub miejscach poszukiwań, opracowywana jest w pełni samodzielna jednostka (z wbudowanymi źródłami kalibracji i przetwarzaniem danych). Poprzez demonstrację działania poza laboratorium zespół MIRORES zmniejsza ryzyko związane z ewentualnym wykorzystaniem w przestrzeni kosmicznej i buduje wiarygodność zastosowania w przemyśle ziemskim.

Perspektywy na przyszłość i wizja strategiczna

Dzięki zgodności z aktualnymi inicjatywami badawczymi MIRORES szybko przechodzi od etapu koncepcji do wdrożenia. Instrument został wybrany jako podstawowy ładunek w badaniu fazy A dla potencjalnej misji księżycowej, gdzie jego zdolność MIR $\sim 6\text{--}20 \mu\text{m}$ wypełnia zauważalną lukę w wymaganiach naukowych misji. W ramach sponsorowanej przez ESA fazy A projektu High-Resolution Lunar Mineralogy Mapper zespół udoskonalił projekt lotu MIRORES, aby zapewnić, że pole widzenia, rozdzielczość spektralna i inne parametry spełniają ograniczenia statku kosmicznego. W ciągu najbliższych 1–2 lat zespół zamierza podnieść poziom gotowości technologicznej (TRL) instrumentu kosmicznego z obecnego

~ 5 (walidacja komponentów w laboratorium) do TRL 7–8 poprzez zbudowanie modelu kwalifikowanego pod względem inżynierskim oraz modelu lotniczego. Modele te zostaną poddane testom termiczno-próżniowym, testom wibracyjnym oraz kalibracji radiometrycznej w celu symulacji warunków panujących na orbiterze księżycowym. Celem jest przygotowanie misji MIRORES do 2028 r. i jej rozpoczęcie do 2029 r.

Równolegle strategiczna wizja obejmuje również wykorzystanie komercyjne i naukowe na Ziemi. Dążenie do zrównoważonej gospodarki kosmicznej uwydatniło, w jaki sposób technologie opracowane na potrzeby eksploracji mogą stymulować innowacje na Ziemi [6]. MIRORES stanowi przykład tego paradygmatu podwójnego zastosowania. Ponieważ agencje kosmiczne i przedsiębiorstwa inwestują w poszukiwania na Księżycu, ten sam czujnik może być oferowany przedsiębiorstwom górniczym lub geologom na Ziemi jako narzędzie do szybkiego mapowania minerałów. Przewidujemy model usług, w którym instrumenty MIRORES są rozmieszczane (na dronach lub stałych platformach) w celu skanowania obszarów zainteresowania zidentyfikowanych na podstawie zdjęć satelitarnych, zapewniając wysokiej jakości mapy mineralogiczne, które służą jako wskazówki do wiercenia lub wydobywania. Takie podejście zmniejszy koszty i czas kampanii eksploracyjnych poprzez precyzyjne wskazanie obszarów bogatych w rudy za pomocą teledetekcji zamiast szeroko zakrojonych badań próbnych. Wstępne rozmowy z partnerami branżowymi koncentrowały się na integracji danych MIRORES z istniejącymi procesami poszukiwawczymi, na przykład poprzez wykorzystanie hiperspektralnych obrazów termicznych wraz z konwencjonalnymi badaniami lotniczymi. Dzięki modułowej konstrukcji instrumentu możemy dostosować go do różnych platform: wersja próżniowa do statków kosmicznych i wersja atmosferyczna (z obudową ochronną i chłodzeniem) do użytku naziemnego.

Co ważne, pojawienie się MIRORES następuje w momencie gwałtownego

wzrostu popytu na minerały krytyczne. Międzynarodowa Agencja Energetyczna (IEA) poinformowała w 2023 r., że globalny popyt na pierwiastki ziem rzadkich może wzrosnąć o 300–700% do 2040 r. w scenariuszach dotyczących czystej energii [9]. Elementy takie jak fosfor (w rolnictwie) oraz metale, takie jak miedź, nikiel i kobalt, również mają odnotować gwałtowny wzrost popytu [9]. Zaspokojenie tego popytu w sposób zrównoważony będzie wymagało nie tylko wydobywania nowych złóż na Ziemi, ale także, w dłuższej perspektywie, pozyskiwania surowców spoza naszej planety. MIRORES przyczynia się do realizacji obu tych celów: umożliwia bardziej efektywne odkrywanie pozostałych zasobów Ziemi oraz charakteryzuje zasoby pozaziemskie, które mogą stanowić podstawę eksploracji Księżyca. Instrument ten jest zatem zgodny z szeroką wizją strategiczną podzielaną przez agencje kosmiczne i przemysł, zgodnie z którą mapowanie i wykorzystanie zasobów stanowi pomost między eksploracją kosmosu a potrzebami gospodarczymi Ziemi [5].

W sektorze kosmicznym MIRORES ma szansę przyczynić się do realizacji przyszłych misji skupionych na geologii Księżyca, zwłaszcza jako główny lub dodatkowy ładunek w misjach małych satelitów orbitujących wokół Księżyca. Ze względu na niewielką masę i moc MIRORES może być również brany pod uwagę w misjach na asteroidy lub Marsa. Podsumowując, MIRORES reprezentuje nową klasę spektrometrów MIR/FIR, które łączą innowacje techniczne ze strategicznym znaczeniem dla poszukiwania zasobów. Przyczynia się do realizacji celów naukowych, wypełniając lukę obserwacyjną w zakresie MIR/FIR i identyfikując minerały kluczowe dla nauk planetarnych i wykorzystania zasobów in situ. Jednocześnie odpowiada na komercyjne zapotrzebowanie na ulepszone narzędzia do wykrywania minerałów na Ziemi w momencie, gdy bezpieczeństwo zasobów ma ogromne znaczenie. W miarę jak ludzkość rozszerza swój zasięg na Księżyc i dalej, instrumenty takie jak MIRORES będą naszymi „oczami” w długościach fal, które dotychczas były pomijane, prowadząc

nas do materiałów, które będą napędzać zarówno eksplorację kosmosu, jak i zrównoważony rozwój na Ziemi.

Wnioski

MIRORES to kompaktowy spektrometr średniej i dalekiej podczerwieni, zaprojektowany w celu wypełnienia luki obserwacyjnej w zakresie 6–20 μm dla minerałów zawierających zasoby na Księżycu, jednocześnie wspierając poszukiwania minerałów na Ziemi. Ta technologia kosmiczna o podwójnym zastosowaniu stanowi przykład innowacji międzysektorowej: techniki opracowane do eksploracji Księżyca mogą bezpośrednio usprawnić poszukiwania minerałów na Ziemi i zarządzanie zasobami. Z perspektywy krajowej MIRORES stanowi dla Polski niszową szansę w sektorze kosmicznym, wykorzystując krajową wiedzę specjalistyczną w zakresie projektowania systemów optoelektronicznych, które działają niezawodnie w warunkach wysokiego promieniowania, bardzo niskich temperatur i braku pary wodnej w atmosferze. Dzięki połączeniu dostosowanego zakresu spektralnego, wysokoczułych chłodzonych detektorów i kompaktowej, składanej konstrukcji optycznej, MIRORES umożliwia wykrywanie kluczowych minerałów rudnych, takich jak apatyt i ilmenit, z orbity księżycowej, platform UAV i stałych instalacji przemysłowych. Planowane dopracowanie instrumentu kosmicznego do misji księżycowej, wraz z trwającymi próbami terenowymi i integracjami naziemnymi, wskazuje, że MIRORES może służyć jako pomost technologiczny między poszukiwaniem zasobów kosmicznych a bardziej wydajnymi, opartymi na danych procesami eksploracyjnymi w sektorach górnictwa i geologii.

Podziękowania

Praca została sfinansowana przez projekt ESA SPARK nr 1-2024/08 oraz projekt Narodowego Centrum Nauki w Polsce nr 2020/37/B/ST10/01420 dla Jakuba Ciążeli.

Materiały źródłowe

- [1] Nishiyama, G., Namiki, N., Sugita, S. i Uno, S. (2022). Wykorzystanie satelity meteorologicznego jako teleskopu kosmicznego: widmo średniej podczerwieni Księżyca widziane przez Himawari-8. *Earth, Planets and Space*, 74, 105. DOI: 10.1186/s40623-022-01662-x.
- [2] Bandfield, J.L., Ghent, R.R., Vasavada, A.R., Paige, D.A., Lawrence, S.J. i Robinson, M.S. (2011). Obfitość skał na powierzchni Księżyca i temperatury drobnych cząstek regolitu na podstawie danych z radiometru LRO Diviner. *Journal of Geophysical Research*, 116, E00H02. <https://doi.org/10.1029/2011JE003866>
- [3] Bandfield, J.L., Hayne, P.O., Williams, J.P., Greenhagen, B.T. i Paige, D.A. (2015). Chropowatość powierzchni Księżyca na podstawie obserwacji radiometru LRO Diviner. *Icarus*, 248, 357–372. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.11.009>
- [4] Honniball, C. I., Lucey, P. G., Li, S., Shenoy, S., Orlando, T. M., Hibbitts, C. A., Hurley, D. M. i Farrell, W. M. (2021). Woda molekularna wykryta na oświetlonym przez Słońce Księżycu przez SOFIA. *Nature Astronomy*, 5, 121–127. DOI: 10.1038/s41550-020-01222-x.
- [5] Neal, C. R., Salmeri, A., Abbud-Madrid, A., Carpenter, J. D., Colaprete, A., Hibbitts, K. A., Kleinhenz, J., Link, M. i Sanders, G. (2024). Księżyc potrzebuje międzynarodowej kampanii poszukiwania zasobów księżycowych. *Acta Astronautica*, 214, 737–747. DOI: 10.1016/j.actaastro.2023.11.017.
- [6] Europejska Agencja Kosmiczna (ESA). (2019). Strategia ESA dotycząca zasobów kosmicznych. Paryż: ESA. Dostępne pod adresem: <https://sci.esa.int/s/WyP6RXw>
- [7] Kahle, A. B. i Rowan, L. C. (1980). Ocena wielospektralnych obrazów lotniczych w średniej podczerwieni do celów mapowania litologicznego w górach East Tintic w stanie Utah. *Geology*, 8(5), 234–239. DOI:10.1130/0091-7613(1980)8<234:EOMMIA->2.0.CO;2..
- [8] Taranik, J. V., Coolbaugh, M. F. i Vaughan, R. G. (2009). Przegląd teledetekcji w podczerwieni termicznej z zastosowaniem do poszukiwań geotermalnych i mineralnych w Wielkiej Kotlinie w zachodniej części Stanów Zjednoczonych. Teledetekcja i geologia spektralna (Recenzje w geologii ekonomicznej, tom 16, str. 41–57). Towarzystwo Geologów Ekonomicznych. DOI: 10.5382/Rev.16.05
- [9] Międzynarodowa Agencja Energetyczna (IEA). (2021). Rola minerałów krytycznych w przejściu na czystą energię: Raport specjalny World Energy Outlook. Paryż: IEA. Dostępny pod adresem: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- [10] Ciążela, J., Bąkała, J., Kowaliński, M., Plocieniak, S., Zalewska, N., Pieterek, B., Mrozek, T., Ciążela, M., Paślowski, G., Stęśliński, M., Szaforz, Ż., Barylak, J., Kuzaj, M., Maturilli, A., Helbert, J., Muszyński, A., Rataj, M., Gburek, S., Józefowicz, M. i Marciniak, D. (2022). Koncepcja i projekt spektrometru dalekiej podczerwieni ORE na Marsie (MIRORES). *Teledetekcja*, 14(12), 2799. DOI: 10.3390/rs14122799.
- [11] Ciążela, J., Bąkała, J., Kowaliński, M., Pieterek, B., Stęśliński, M., Ciążela, M., Paślowski, G., Zalewska, N., Sterczewski, Ł., Szaforz, Ż., Józefowicz, M., Marciniak, D., Fitt, M., Śniadkowski, A., Rataj, M. i Mrozek, T. (2023). Geologia rud księżycowych i możliwość wykrywania minerałów rudnych za pomocą spektrometru dalekiej podczerwieni. *Frontiers in Earth Science*, 11, 1190825. DOI: 10.3389/feart.2023.1190825.
- [12] Ciążela, J., Bąkała, J., Kowaliński, M., Ciążela, M., Zalewska, N., Badura, I. i Goski, S. (2025). MIRORES: kompaktowy spektrometr dalekiej podczerwieni do identyfikacji rud księżycowych i przyszłych misji ISRU. 76. Międzynarodowy Kongres Astronautyczny (IAC 2025), Sydney, Australia, 29 września – 3 października 2025 r. © Międzynarodowa Federacja Astronautyczna.