

# Detekcja biomarkerów w pióropuszcach gazowych za pomocą kamery wielospektralnej w projektowanej misji Enceladus Orbiter (NASA)

Natalia Zalewska<sup>1,2</sup>, Jan Kotlarz<sup>1</sup>, Mariusz Kacprzak<sup>1</sup>, Tomasz Korniluk<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instytut Lotnictwa, Zakład Teledetekcji, Al. Krakowska 110/114, 02-256, Warszawa,

<sup>2</sup> Centrum Badań Kosmicznych PAN, ul. Bartycka 18A, 00-001 Warszawa

**Streszczenie:** W publikacji podjęto się próby odpowiedzi na pytanie o możliwość analizy składu chemicznego pióropuszy, wykorzystując ich wielospektralne zobrażenia wykonane za pomocą projektowanych dla nowej misji układów optycznych. Stosując teoretyczną analizę transmitancji warstw gazowych złożonych z H<sub>2</sub>O i CO<sub>2</sub> oraz na podstawie przyjętego fizycznego modelu transmitancji promieniowania przez warstwę gazu widocznego na tle o ustalonej reflektancji wybrano pasmo optyczne 0,73 μm pozwalające na najlepsze rozróżnienie tych dwóch substancji. W celu walidacji otrzymanego wyniku przeprowadzono eksperyment fotografując za pomocą kamery wielospektralnej Quercus.6 strumienie gazowe złożone z obu biomarkerów na tłach o wysokiej (> 0,95) oraz niskiej (< 0,05) reflektancji w paśmie światła widzialnego i NIR. Pozyskane dane potwierdziły wynik analizy sygnatur spektralnych transmitancji obu biomarkerów. Na podstawie otrzymanego w doświadczeniu wyniku ustalono brzegowe parametry sensora i układu optycznego dla projektowanej dla orbitera kamery wielospektralnej pozwalające na oszacowanie względnej zawartości H<sub>2</sub>O i CO<sub>2</sub> w pióropuszcach fotografowanych na tle przestrzeni kosmicznej z dokładnością 2%: kanał optyczny  $\lambda = 0,730 \pm 0,020 \mu\text{m}$ , prędkość względna między orbiterem a księżycem  $v < 200 \text{ m/s}$ , czas ekspozycji  $t_{\text{EXP}} < 12 \text{ ms}$ , iloczyn współczynnika efektywności kwantowej całego układu optycznego i względnych różnic reflektancji rejestrowanych obiektów w wybranym kanale  $\geq 2,5\%$ , wielkość pojedynczego piksela na detektorze CCD  $\geq (3,75 \cdot 3,75) \mu\text{m}^2$ , głębokość studni potencjału piksela CCD  $\geq 12\,400 \text{ e}^-$ , zapis danych RAW co najmniej 8-bitowy. Otrzymany optymalny kanał nie był rejestrowany za pomocą stosowanych w poprzednich misjach sensorów optycznych MVIC. Stosowanie opisanej metodyki rozróżniania biomarkerów jest możliwe pod warunkiem, że jeden z czterech kanałów optycznych projektowanej kamery MAC będzie zawierać kanał 0,73 μm.

**Keywords:** Enceladus, biomarkery, analiza wielospektralna, sensory

## 1. Wprowadzenie

Poszukiwanie znaków przeszłego lub teraźniejszego życia w Układzie Słonecznym jest jednym z największych przedsięwzięć naukowych w dziedzinie nauk o kosmosie [15]. Metody detekcji biomarkerów występujących w postaci lotnej stosowane dotąd w misjach na Marsa oraz księżyce Jowisza i Saturna

są niezwykle zróżnicowane. Analizatory kwadrupolowe służą do detekcji składu chemicznego gazów atmosferycznych, np. dwutlenku węgla (CO<sub>2</sub>) i metanu (CH<sub>4</sub>) w atmosferze Marsa [12]. Oparty na zjawisku elektroforezy kapilarnej Mars Organic Analyzer został zaprojektowany do detekcji dwóch utlenionych postaci węgla: aldehydów i ketonów [20]. Detekcja biomarkerów prowadziła zawsze do analizy lokalnych warunków geologicznych i fizykochemicznych w celu wykluczenia innego źródła biomarkera niż źródło biogeniczne. Jednym z najnowszych przykładów takiej analizy prowadzonej w środowisku planetologów jest aktywność kriowulkaniczna i związane z nią biomarkery wykryte w pióropuszcach gazowych, występujące na południowej półkuli Enceladusa, lodowym księżycu Saturna.

Przyczyna występowania na południowej półkuli Enceladusa aktywności kriowulkanicznej i związanych z nią gazowych pióropuszy jest jedną z największych zagadek związanych z badaniami licznych księżyców zewnętrznych planet Układu Słonecznego.

### Autor korespondujący:

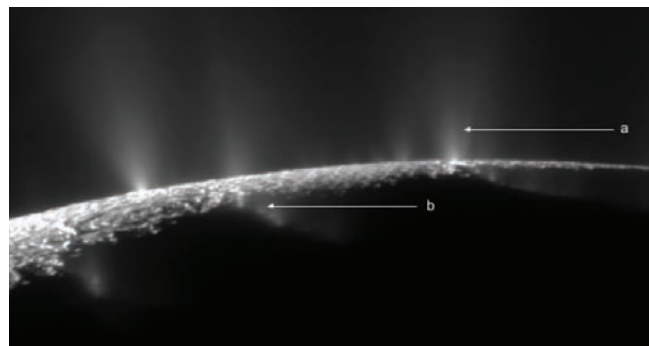
Jan Kotlarz, jan.kotlarz@uw.edu.pl

### Artykuł recenzowany

nadesłany 05.06.2017 r., przyjęty do druku 14.07.2017 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0



Rys. 1. Pióropusze Enceladusa widoczne na tle przestrzeni kosmicznej (a) oraz na tle powierzchni księżycy (b), fot. sonda Cassini  
 Fig. 1. Enceladus plumes visible on the dark space background (a) and the moon's surface (b), photo: Cassini mission

Możliwość istnienia pod lodową skorupą Enceladusa oceanu potwierdzona została m.in. przez bezpośredni pomiar składu chemicznego pióropuszy w trakcie przelotu sondy Cassini 168,2 km nad jego powierzchnią. Spośród czterech głównych składników badanego pióropusza aż trzy zaliczane są do standardowych biomarkerów ( $H_2O$ ,  $CO_2$  i  $CH_4$ ). Zaobserwowana również przez sondę Cassini zmienność parametrów fizycznych pióropuszy oraz możliwość wnioskowania na ich podstawie o naturze aktywności kriowulkanicznej i biotycznych przyczynach obecności biomarkerów są ważnymi przyczynami prac nad nową misją NASA dedykowaną obserwacji Enceladusa.

Dyskusja dotycząca istnienia i warunków panujących w ewentualnym oceanie pod lodową warstwą zewnętrzną na Enceladusie [2, 11, 13, 24, 25], zwróciła uwagę na wydobywające się przez obecne na południowej półkuli księżycy szczeliny pióropusze gazów (rys. 1) i wypracowanie metodyki pośrednich pomiarów składu chemicznego oceanu, jego pH i temperatury, dostępnej do wykorzystania energii oraz zachodzących w jego wnętrzu procesów geologicznych za pomocą oceny parametrów pióropuszy [4].

Enceladus porusza się wewnątrz słabego, rozmytego pierścienia E, rozciągającego się na obszarze między 180 000 km a 480 000 km od środka Saturna. Jest siedem razy mniejszy od księżycy Ziemi a jego gęstość wynosi  $1,61 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , niewiele powyżej gęstości wody. Sonda Cassini, przelatując w 2005 r. w odległości 500 km nad księżycem, sfotografowała jego powierzchnię, na której zauważono charakterystyczne linijne szczeliny i grzbiety przypominające ziemskie ryfty, z których wydobywają się pióropusze pary wodnej i kryształków lodu.

Mechanizm, który powoduje takie wyrzuty wodne nie jest jeszcze zbadany, ale tłumaczy się go m.in. pływami od Saturna i istnieniem rezonansu między księżycami Enceladus – Dione [17]. W wyniku tej interakcji zachodzą złożone zjawiska tektoniczne charakteryzujące się powstawaniem spreadingu, a w konsekwencji wulkanów wodnych lub gejzerów.

Na podstawie ostatnich wyliczeń [21] szacuje się, że skorupa lodowa Enceladusa ma grubość ponad 30 km w okolicy równika, a tylko 5 km w okolicy bieguna południowego, natomiast woda wydobywająca się z wnętrza pochodzi z głębokości 75 km. Aparatura Cassini Composite Infrared Spectrometer (CIRS) zmierzyła temperaturę w pobliżu bieguna południowego, która wynosiła około 157 K, co sugeruje, że małe obszary Enceladusa są w jakiś sposób podgrzewane [18] w stosunku do pozostałych obszarów o temperaturze 85–90 K. Istnieje kilka modeli, za pomocą których próbuje się opisywać obserwowane zjawiska, np. model podgrzewania pływowego, podgrzewania w wyniku rozpadu promieniotwórczego lub chemicznego w wyniku rozpuszczenia amoniaku. Najbardziej prawdopodobny jest model, który tłumaczy podgrzewanie obecnością oddziaływania ze sobą energii rotacyjnej, orbitalnej i masy Saturna [8].

Podczas przelotu w lipcu 2005 r. 168,2 km nad powierzchnią Enceladusa, sonda Cassini za pomocą INMS (ang. *Ion and Neutral Mass Spectrometer*) wykonała pomiar składu procentowego jednego z pióropuszy, otrzymując wynik  $91,0 \pm 3,0\% H_2O$ ,  $3,2 \pm 0,6\% CO_2$ ,  $4,0 \pm 1,0\% N_2$  lub  $CO$  i  $1,6 \pm 0,4\% CH_4$  [23]. Obecność  $N_2$  została potwierdzona w 2007 r. podczas zakrycia Słońca za pomocą analizy danych zainstalowanego na sondzie Cassini spektrografu. W październiku 2011 r. nowo zaobserwowane pióropusze zakryły kolejno gwiazdy  $\epsilon$  oraz  $\zeta$  *Orionis*, pozwalając na potwierdzenie obecności wody jako dominującego ich składnika za pomocą analizy wielospektralnej. Nie zaobserwowano natomiast obecności w pióropuszcach wodoru i tlenu [5]. Na podstawie wszystkich obserwacji i zebranych danych można przypuszczać, że składnikiem pióropuszy są co najmniej dwa gazy należące do grupy biomarkerów: woda i dwutlenek węgla. Ich refleksyjność rejestrowana przez sensor zmienia się w czasie i jest zależna od kąta widzenia spektrometrów [6, 9].

Na podstawie pomiarów przeprowadzonych w ciągu sześciu przelotów w latach 2008–2013 potwierdzono również zmienną gęstość strumienia cząsteczek [14]. Zmienność parametrów chemicznych i fizycznych pióropuszy oraz możliwość wnioskowania na ich podstawie o naturze aktywności kriowulkanicznej i biotycznych przyczynach obecności biomarkerów są ważnymi

Tabela 1. Parametry kamery ze standardową optyką MAC proponowanej w ramach misji Enceladus Orbiter [19]  
 Table 1. Proposed for Enceladus Orbiter mission Medium-Angle Camera (MAC) parameters [19]

Item	Value	Units
Type of instrument	Optical	
Number of channels	4	
Size/dimensions	$0.20 \times 0.05 \times 0.05$	m × m × m
Instrument mass without contingency (CBE <sup>a</sup> )	10	kg
Instrument mass contingency	30	%
Instrument mass with contingency (CBE + Reserve)	13	kg
Instrument average payload power without contingency	5	W
Instrument average payload power contingency	30	%
Instrument average payload power with contingency	6.5	W
Instrument average science data rate <sup>a</sup> without contingency	2,400	kbps
Instrument average science data <sup>a</sup> rate contingency	30	%
Instrument average science data <sup>a</sup> rate with contingency	3,120	kbps
Instrument fields of view (if appropriate)	$5.8 \times 0.15$	degrees
Pointing requirements (knowledge)	0.075	degrees
Pointing requirements (control)	0.29	degrees
Pointing requirements (stability)	0.0115	deg/sec

<sup>a</sup>CBE = Current best estimate.

<sup>a</sup>Instrument data rate defined as science data rate prior to onboard processing.

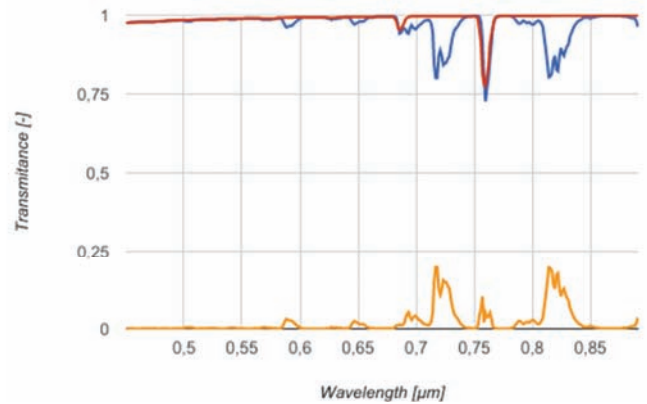
czynnikami zachęcającymi do prac nad nową misją NASA dedykowaną obserwacji Enceladusa. Zważając na to, że na Europie – księżycu Jowisza – przewiduje się istnienie kominów hydrotermalnych, czyli szczelin na dnie oceanu, przez które wydobywa się podgrzana woda, to nie wyklucza się występowania podobnego zjawiska na Enceladusie. Takie kominy na Ziemi potrafią być miejscami z ekosystemami o szeroko rozwiniętej bioróżnorodności. Uważa się ponadto, że synteza aminokwasów mogła pojawić się głęboko w skorupie ziemskiej i wytworzone tam związki były następnie wyrzucane wraz z cieczą hydrotermalną do chłodniejszej wody, gdzie niższa temperatura i obecność minerałów ilastych wspierały tworzenie się peptydów i protokomórek [22]. Zaproponowano, że życie powstało na zewnątrz stref najgorętszych. Jest to atrakcyjna hipoteza z uwagi na obfitość metanu i amoniaku w regionach kominów hydrotermalnych i może bezpośrednio łączyć się z detekcją tych związków na księżycu Saturna.

Ponieważ dotychczasowe pośrednie badania prowadzone nad składem chemicznym pióropuszy prowadzone były głównie za pomocą spektrometrów, należy zadać sobie pytanie, czy jest możliwe oszacowanie (względnej) gęstości obu biomarkerów w pióropuszkach w oparciu o bardziej atrakcyjne pod względem dostępności zwykle zdjęcia wielospektralne. Obiekty te były już obrazowane za pomocą kamer wielospektralnych na pokładzie sondy Cassini [16] za pomocą umieszczonych na pokładzie dwóch instrumentów: Wide Angle Camera (kamera szerokokątna o zdolności rozdzielczej  $59,749 \mu\text{rad}/\text{px}$  wyposażona w 18 filtrów barwnych w zakresie długości fal  $0,38\text{--}1,05 \mu\text{m}$ ) oraz Narrow Angle Camera (kamera wąskokątna o zdolności rozdzielczej  $5,9907 \mu\text{rad}/\text{px}$  wyposażona w 24 filtry barwne w zakresie długości fal  $0,20\text{--}1,05 \mu\text{m}$ ).

Pod względem analizy spektralnej w zakresie od  $0,5 \mu\text{m}$  do  $1,0 \mu\text{m}$  głównymi składnikami odpowiadającymi za absorpcję promieniowania elektromagnetycznego są: tlen, ozon oraz para wodna. Natomiast dwutlenek węgla może być traktowany jako materiał przepuszczalny dla promieniowania elektromagnetycznego w tym zakresie, z wyjątkiem wyraźnych minimów transmitancji w okolicy  $0,68 \mu\text{m}$  i  $0,76 \mu\text{m}$  (rys. 2b).

W projektowanej misji Enceladus Orbiter przewidziano specjalne fazy misji, podczas których zaplanowano przeloty w okolicach pióropuszy (orbita o inklinacji  $62^\circ$ ) w celu dokonania pomiarów ich parametrów [19]. Niestety, ze względu na ograniczony udźwig (ang. *payload*) wiele z instrumentów używanych jako standard w badaniach składu aerozoli nie znajdzie się na pokładzie lub ich obecność jest podawana w wątpliwość. Na przykład spektrometr bliskiej podczerwieni pozwoliłby na zdalną detekcję wielkości cząstek wchodzących w skład pióropuszy, ale na Enceladusie dominują klasy pokrycia terenu różniące się w NIR, takie jak lód i kilka dodatkowych składników, które były rozróżniane przez sondę Cassini w zakresie promieniowania widzialnego oraz w podczerwieni przez spektrometr VIMS (ang. *Visible and Infrared Mapping Spectrometer*). Ponadto badania, które mogłyby być prowadzone za pomocą spektrometru bliskiej podczerwieni mogą być prowadzone bezpośrednio za pomocą Dust Analyzer. W pracy staramy się odpowiedzieć na pytanie, czy obserwacje wykonywane przez projektowaną w ramach misji wielospektralną kamerę ze standardową optyką (tabela 1) mogą w praktyczny sposób wspomóc badania względnych proporcji biomarkerów:  $\text{H}_2\text{O}$  i  $\text{CO}_2$  w pióropuszkach.

Według koncepcji projektowanej misji [19] wielospektralna kamera ze standardową optyką (MAC) będzie rejestrować promieniowanie w trzech lub czterech zakresach spektralnych. Przyjęte w poprzednich misjach w analogicznym systemie sensorów MVIC zakresy obejmują światło widzialne ( $0,400\text{--}0,550 \mu\text{m}$  i  $0,540\text{--}0,700 \mu\text{m}$ ) oraz bliską podczerwień ( $0,780\text{--}0,975 \mu\text{m}$  i  $0,860\text{--}0,910 \mu\text{m}$ ). Należy zwrócić uwagę na pomijane w dotychczasowych konfiguracjach pasmo  $0,700\text{--}0,780 \mu\text{m}$  [7].



Rys. 2. Transmitancja pary wodnej (kolor niebieski) w atmosferze Ziemi, bardzo duże nasycenie pary wodnej =  $10000 \text{ [atm}\cdot\text{cm]}$ ) oraz dwutlenku węgla (czerwony) w atmosferze Ziemi (duże nasycenie dwutlenku węgla =  $1000 \text{ [ppmv]}$ ) [1]. Różnicę zaznaczono kolorem żółtym. W badanym zakresie  $0,46\text{--}0,88 \mu\text{m}$  widoczne są dwa optymalne zakresy różnicujące oba biomarkery  $0,72\text{--}0,74 \mu\text{m}$  i  $0,81\text{--}0,83 \mu\text{m}$ , przy czym ten pierwszy posiada lepszą sumaryczną efektywność kwantową układu optycznego kamery

Fig. 2. Water vapor transmittance (blue) in Earth atmosphere,  $10000 \text{ [atm}\cdot\text{cm]}$  and carbon dioxide (red) ( $1000 \text{ [ppmv]}$ ) [1]. Difference shown as yellow plot. In wavelengths  $0,46\text{--}0,88 \mu\text{m}$  there are two optical bands separating those two biomarkers:  $0,72\text{--}0,74 \mu\text{m}$  and  $0,81\text{--}0,83 \mu\text{m}$ , but the first one has better quantum efficiency of the camera optical system

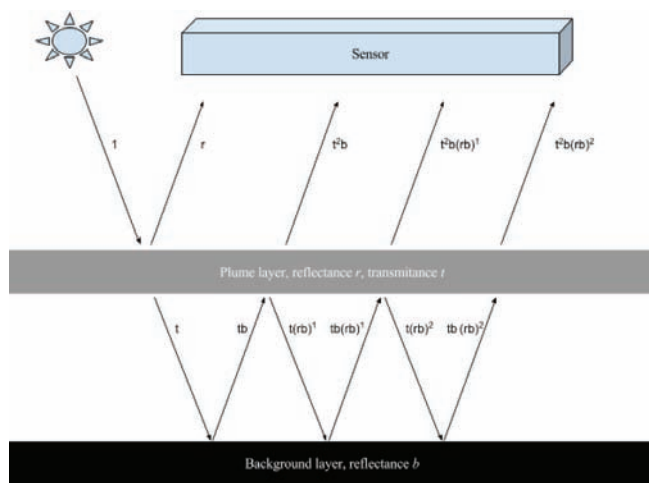
## 2. Metody

Na podstawie (a) sygnałów spektralnych transmitancji obu biomarkerów, (b) przyjętego modelu refleksyjności warstw gazowych na tle o stałej refleksyjności, (c) parametrów układu optycznego i sensorów CCD kamery wielospektralnej Quercus.6 oszacowano teoretyczne różnice w sygnale rejestrowanym przez kamerę wielospektralną w zakresie  $0,46\text{--}0,88 \mu\text{m}$  między pióropuszkami złożonymi w  $100\%$  z  $\text{H}_2\text{O}$  lub w  $100\%$  z  $\text{CO}_2$ . Następnie na Stanowisku Laboratoryjnym Pozyskiwania Sygnałów Spektralnych wyposażonym w źródła światła o spektrum emisyjnym odpowiadającym słonecznemu wykonano doświadczenie z użyciem kamery wielospektralnej Quercus.6 polegające na obrazowaniu strumieni gazowych o zmiennej gęstości złożonych z obu biomarkerów na tłach o wysokiej ( $> 0,95$ ) oraz niskiej ( $< 0,05$ ) refleksyjności w paśmie światła widzialnego i NIR.

### 2.1. Model refleksyjności warstwy gazu na tle o ustalonej refleksyjności

W modelu opisującym natężenie promieniowania pochodzącego od pióropusza zakłada się, że jest on mieszaniną dwóch gazów  $\text{H}_2\text{O}$  i  $\text{CO}_2$  o różnej gęstości  $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$  oraz  $\rho_{\text{CO}_2}$ . Warstwa zawierająca tę mieszaninę widoczna jest na tle materiału o znanej refleksyjności. W tym badaniu przyjmujemy, że tłem może być lodowa powierzchnia księżycy lub przestrzeń kosmiczna (rys. 1).

Sygnał  $I$  rejestrowany przez detektor kamery w obszarze pióropusza jest sumą sygnałów pochodzących od odbicia promieniowania słonecznego samego pióropusza oraz od tła (rys. 3). W modelu przyjmujemy, że dla każdego kanału optycznego gaz pióropusza ma zdefiniowaną refleksyjność  $r$  oraz transmitancję  $t$ . Do obliczenia  $r$  przyjęto wartości refleksyjności dla obu gazów wygenerowane na podstawie wykresów transmitancji pozyskanych z serwisu MODTRAN ([1], rys. 2a i b). W modelu tym przyjęto temperaturę tła kosmicznego  $3 \text{ K}$ , maksymalną widoczność na drodze: sensor – obiekt rejestrowany oraz maksymalne (uwzględnione w modelowaniu) nasycenie gazem. Odpowiednio dla pary wodnej (rys. 2a):  $10000 \text{ (atm}\cdot\text{cm)}$  oraz dla  $\text{CO}_2$ :  $1000 \text{ (ppmv)}$ .



Rys. 3. Model natężenia promieniowania rejestrowanego w obszarze pióropuszcza o refleksyjności  $r$ , transmitancji  $t$  na tle materiału o refleksyjności  $b$

Fig. 3. Plume radiation intensity model with plume reflectance  $r$ , transmittance  $t$  visible in front of the material with reflectance  $b$

Przyjmujemy, że refleksyjność tła jest stała w całym obszarze zobrazowanego pióropuszcza i wynosi  $b$ . Podczas przejścia przez pióropuszc promieniowanie słoneczne o natężeniu  $I_s$  dzieli się na część odbitą oraz podlegającą transmitancji. Współczynniki odbicia  $R$  i transmitancji  $T$  zależą zarówno od samej refleksyjności i transmitancji gazu, jak i od jego gęstości. W modelu zakładamy, że  $R + T = I_s$ , zatem  $r + t = 1$ . Wtedy  $R \sim r_i \rho$  i  $T \sim t_i \rho$ . Po  $n$  odbiciach między pióropuszcem a tłem (powierzchnią Enceladusa) otrzymujemy wzór na natężenie światła pochodzącego z rejonu, w którym obserwujemy pióropuszc:

$$S(n) \approx r\rho + (t\rho)^2 b \sum_{k=0}^n (br\rho)^k. \quad (1)$$

Dla bardzo dużej liczby odbić między pióropuszcem a tłem otrzymujemy:

$$S(n \rightarrow \infty) = \lim_{n \rightarrow \infty} S(n) \approx r\rho + \frac{(\rho t)^2 b}{1 - br\rho}. \quad (2)$$

Zauważmy, że dla dowolnego typowego wskaźnika będącego ilorazem sygnałów rejestrowanych w dwóch kanałach  $W = S_1/S_2$ , otrzymujemy dla modelu wartość zależną od iloczynu gęstości pióropuszcza i refleksyjności tła w obu kanałach optycznych  $\rho b_1$  oraz  $\rho b_2$ . Nie jest to pożądana właściwość, ponieważ musimy założyć, że w warunkach realizacji misji Enceladus Orbiter nie znamy gęstości fotografowanych pióropuszczy.

Jedyną możliwością eliminacji tego problemu jest sytuacja, gdy wartości  $b_1$  i  $b_2$  są bliskie zeru. Ma to miejsce dla bardzo ciemnego tła, co oznacza, że dla wskaźników ilorazowych należy brać pod uwagę wyłącznie obszary pióropuszczy wykonane na tle pustej przestrzeni kosmicznej. Wzór (2) redukuje się wtedy do prostej zależności  $S \sim \rho r$ , a wskaźnik przyjmuje postać  $W = r_1/r_2$ . Tego typu wskaźniki przyjęto w dalszych rozważaniach jako niezależne od nieznannej gęstości pióropuszczy:

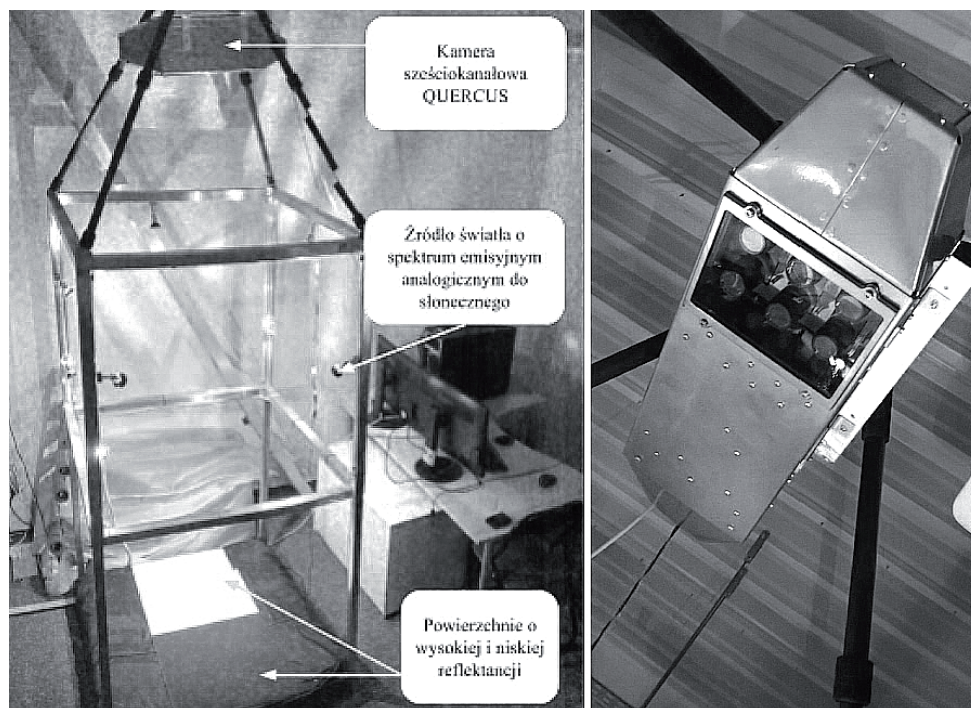
$$\xi_{A,B} = \frac{S(\lambda_A)}{S(\lambda_B)} \quad (3)$$

## 2.2. Wyznaczenie wartości piksela obrazującego pióropuszc dla sensora o zadanych parametrach

Dla wybranych zakresów spektralnych, na podstawie krzywej efektywności kwantowej matrycy CCD oraz szczegółowych charakterystyk filtrów wyznaczono parametr sumarycznej efektywności kwantowej ( $QE_{eff}$ ) układu: sensor, obiektyw, filtr w wybranych zakresach spektralnych. W tym celu obliczono iloczyn z transmitancji filtru optycznego  $T(\lambda)$ , czułości matrycy  $QE(\lambda)$ , wartości przysłony dla kanału optycznego  $f(\lambda)$  i transmitancji obiektywu  $L(\lambda)$ :

$$QE_{EFF}(\lambda) = f(\lambda) QE(\lambda) T(\lambda) L(\lambda). \quad (4)$$

Zgodnie z tym modelem oraz parametrami układu optycznego, wpływ na liczbę fotoelektronów zarejestrowanych przez sensor CCD w kanale optycznym  $\lambda$  mają przede wszystkim: a) natężenie  $I$  promieniowania o długości fali  $\lambda$  padającego na obiekt, b) refleksyjność tła  $b$  w tym kanale, c) refleksyjność war-



Rys. 4. Stanowisko laboratoryjne pozyskiwania sygnatur spektralnych z sześciokanałową kamerą wielospektralną Quercus.6, ośmioma źródłami światła o emisyjności odpowiadającej w zakresie VIS i NIR światłu słonecznemu oraz znacznikami terenowymi o refleksyjności powyżej 0,95 i poniżej 0,05 w całym badanym zakresie spektralnym  
Fig. 4. Spectral Signatures Measurement Laboratory with six-channel multispectral camera Quercus.6, eight Sun emission spectrum (VIS and NIR) light sources and high (> 0.95) and low (< 0.05) reflectance surfaces

stwy gazu, d) efektywna wydajność kwantowa układu rejestrującego oraz e) fizyczna wielkość detektora CCD wraz z głębokością studni potencjału. W przypadku jednolitej, niskiej reflektancji tła ( $b = 0$ , we wskazanym przypadku jest to tło przestrzeni kosmicznej) drugi składnik sumy we wzorze drugim zeruje się i przyjmując, iż  $S(\lambda) \sim r(\lambda)$  wartość piksela  $DU$  w kanale optycznym  $\lambda$  wynosi:

$$DU(\lambda) = K G QE_{EFF}(\lambda) t_{EXP} \frac{2^B}{D} \frac{SR_{CCD}}{E(\lambda)} \sum_{i=1}^n w_i r_i(\lambda) I(\lambda) \quad (5)$$

gdzie:  $K$  – ogólny współczynnik konwersji [ $e^-$ ],  $n$  – liczba składników wchodzących w skład warstwy gazu [-],  $t_{EXP}$  – czas ekspozycji [s],  $G$  – wzmacnienie elektroniczne na matrycy CCD (gain) [-],  $B$  – liczba bitów przypadająca na jeden piksel [-],  $D$  – głębokość studni potencjału pojedynczego piksela na matrycy CCD [ $e^-$ ],  $SR_{CCD}$  – powierzchnia pojedynczego piksela na matrycy CCD [ $m^2$ ],  $E(\lambda)$  – energia pojedynczego fotonu o długości fali  $\lambda$  [J],  $w_i$  – udział procentowy gazu  $i$  w pióropuszu [-],  $I(\lambda)$  – moc promieniowania słonecznego w kanale  $\lambda$  na jednostkę powierzchni [ $W/m^2$ ],  $r_i(\lambda)$  – reflektancja gazu  $i$  [-].

### 2.3. Wyznaczenie wartości wskaźnika ilorazowego

Na podstawie wartości  $DU$ , dla każdego pasma optycznego, obliczany jest wskaźnik ilorazowy zgodnie ze wzorem (3). W liczniku umieszczamy  $DU$  dla kanału optycznego o największym zróżnicowaniu między wartością dla  $H_2O$  a  $CO_2$ , w mianowniku – o porównywalnej wielkości dla obu biomarkerów.

### 2.4. Metodyka wykonania eksperymentu walidującego

Eksperyment został przeprowadzony na specjalnie przygotowanym stanowisku laboratoryjnym (rys. 4) wyposażonym w:

- dwa źródła aerozoli złożonych z a)  $H_2O$  oraz b)  $CO_2$ ,
- osiem źródeł światła o spektrum emisyjnym w zakresie VIS i NIR odpowiadającym promieniowaniu słonecznemu o sumarycznym natężeniu w punkcie pomiarowym  $500 W/m^2$ ,
- dwa znaczniki: biały o reflektancji  $> 0,95$  w zakresie VIS i NIR i czarny o reflektancji  $< 0,05$  w zakresie VIS i NIR,
- kamerę wielospektralną Quercus [3] wyposażoną w sześć sensorów z filtrami optycznymi o szerokości połówkowej: FWHM (ang. *full width at half maximum*) 10 nm i środkach pasm transmitancji: 0,46  $\mu m$ , 0,55  $\mu m$ , 0,64  $\mu m$ , 0,73  $\mu m$ , 0,82  $\mu m$  i 0,88  $\mu m$ .

W ramach eksperymentu przeprowadzono trzy serie pomiarowe po 60 s. Podczas każdej serii fotografowano z częstotliwością 1 Hz i jednakowymi parametrami sensorów:

1. oświetlone znaczniki (jasny i ciemny), seria kontrolna,
2. oświetlone znaczniki (jasny i ciemny) ustawione za strumieniem aerozolu  $H_2O$ ,
3. oświetlone znaczniki (jasny i ciemny) ustawione za strumieniem aerozolu  $CO_2$ ,

Na obszarach zdjęcia z widocznymi jasnym i ciemnym znacznikiem wyznaczono dziewięć obszarów pomiarowych o wielkości  $10 px \times 10 px$ .

Odpowiedź spektralną dla każdej z czterech serii dla każdego zdjęcia obliczono jako średni sygnał rejestrowany z 900 px dla białego i 900 px dla czarnego znacznika. W ten sposób otrzymano sześć serii czasowych.

Ponieważ dla znacznika ciemnego zakładamy, że reflektancja wynosi 0, a w rzeczywistości jest  $< 0,05$ , do oszacowania rzeczywistego wpływu strumienia aerozolu na rejestrowaną wartość należy odjąć od wartości serii z aerozolem średnią wartość z serii kontrolnej.

Po uzyskaniu średnich wartości piksela dla  $H_2O$  i  $CO_2$  oraz ich odchył standardowych obliczono testem  $3\sigma$  czy otrzymano wartości  $DU$  różne, czy podobne dla obu biomarkerów korzystając z wzoru:

$$T = \frac{|\overline{DU}_{H_2O} - \overline{DU}_{CO_2}|}{\sqrt{\sigma_{H_2O}^2 + \sigma_{CO_2}^2}} \quad (6)$$

Dla  $T > 3$  przyjmowano, że oba strumienie aerozoli były w danym kanale optycznym rozróżnialne.

## 3. Wyniki

### 3.1. Teoretyczne różnice w sygnale rejestrowanym przez kamerę wielospektralną między strumieniami $H_2O$ i $CO_2$

Dla obliczenia sumarycznej efektywności kwantowej  $QE_{EFF}$  przyjęto parametry z Tab. 1, a dla parametrów niezdefiniowanych w projektowanej misji przyjęto parametry platformy Quercus:  $K = 1/1,8$ ;  $B = 8$ ;  $D = 6,900$ ;  $SR_{CCD} = 10,2 \mu m^2$ . Wartości  $QE_{EFF}$  dla poszczególnych kanałów optycznych przedstawiono w tabeli 2.

#### 3.1.1. Wynik teoretyczny dla orbity Enceladusa o inklinacji $62^\circ$

W fotografii lotniczej oraz w astrofotografii stosowana jest zasada, zgodnie z którą, dla uzyskania nierozmazanego zdjęcia przesunięcie liniowe układu kamera i obiekt fotografowany w czasie trwania akwizycji nie może być większe niż 0,5 wielkości piksela terenowego [10]. Optymalnie, gdy wartość ta nie

Tabela 2. Łączna efektywność kwantowa  $QE_{EFF}$  kamery dedykowanej do obrazowania w zakresie pasm VIS i NIR (Quercus.6)

Table 2. Total quantum efficiency  $QE_{EFF}$  of camera dedicated to VIS and NIR imaging (Quercus.6).

Filtr [nm]	Transmitancja filtra [%]	Czułość matrycy [%]	Transmitancja obiektu [%]	Łączna efektywność kwantowa: $QE_{EFF}$ [%]
460	49,50	51,72	93,00	23,81
550	50,70	54,78	95,00	26,38
640	60,70	38,59	99,00	23,19
730	61,10	25,64	94,00	14,73
820	52,50	14,19	78,67	5,86
880	61,90	8,09	64,33	3,22

**Tabela 3. Teoretyczne wartości pikseli zarejestrowane przez kamerę wielospektralną dla a) orbity Enceladusa i b) eksperymentu z użyciem kamery Quercus.6 przy fotografowaniu pióropuszy na ciemnym tle (b ~ 0)**

Table 3. Theoretical pixel values registered by multispectral camera for a) Enceladus orbit and b) experiment with Quercus.6. camera with dark background (b ~ 0) in both cases

	Zawartość procentowa [%]		Zakres spektralny [nm]												
	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	460	550	570	640	670	700	730	760	820	850	880	940	1000
a) Projektowana kamera dla misji Enceladus Orbiter	100	0	14	11	14	12	6	28	60	19	24	1	1	20	1
	0	100	35	23	23	14	9	55	4	9	1	1	0	0	0
	Maksymalne różnice odczytów wartości w poszczególnych zakresach spektralnych dla obserwacji pióropusza gazowego		21	12	9	2	3	27	<b>56</b>	10	23	0	1	20	1
b) Eksperyment z użyciem kamery Quercus.6	100	0	18	14	18	15	8	37	79	24	32	7	5	26	1
	0	100	46	30	30	19	12	72	5	12	1	3	3	0	0
	Maksymalne różnice odczytów wartości w poszczególnych zakresach spektralnych dla obserwacji pióropusza gazowego		28	16	12	4	4	35	<b>74</b>	12	31	4	2	26	1

przekracza 0,1 wielkości piksela. Dla parametrów misji planowanej na 01/28/2023 wielkość piksela terenowego wynosiłaby przy wykorzystaniu kamery Quercus odpowiednio: 53 m (dla średniej wysokości orbity równej 184 km), 29 m (orbita minimalna 101 km) oraz 76 m (orbita maksymalna równa 267 km). Prędkość liniowa (z uwzględnieniem obrotów kątowych kamery) układu Sonda – Enceladus wynosi maksymalnie (dla operacyjnej fazy pozyskiwania zdjęć) ~200 m/s. Maksymalny czas akwizycji powinien wynosić zatem nie więcej niż  $t_{EXP} = 14$  ms.

Na podstawie rozkładu promieniowania elektromagnetycznego emitowanego przez ciało doskonale czarne o temperaturze fotosfery Słońca (5773 K) można wyznaczyć energię i liczbę fotonów emitowanych w wybranych zakresach spektralnych przez Słońce w ciągu sekundy. Energia pojedynczego fotonu dla fali elektromagnetycznej w przedziale 400–1000 nm wynosi od 3,09 eV do 1,24 eV. W odległości 9,5 jednostek astronomicznych natężenie promieniowania Słońca wynosi około  $I = 15,078$  W/m<sup>2</sup>.

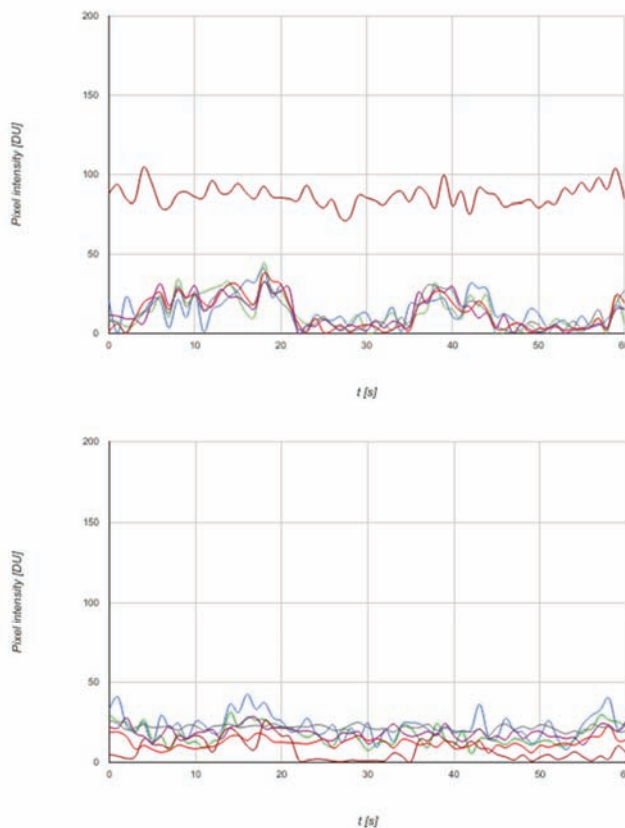
Na podstawie wzoru (5), po uwzględnieniu maksymalnego dopuszczalnego czasu otwarcia migawki (14 ms) obliczono oczekiwane wartości DU, które zarejestruje kamera na orbicie Enceladusa (dla przetwornika 8-bitów) dla obu typów strumieni. Wyniki zaprezentowano w tabeli 3 (a).

Kanałem optycznym, w którym oba typy pióropuszy różnią się najbardziej jest kanał 730 nm, traktowany jako przedział od 725 nm do 735 nm. Różnica wartości DU między biomarkerami wynosi około 56 (DU). Spośród kanałów o najmniejszej różnicy wartości DU wyróżnia się kanał 640 nm, ponieważ dla obu biomarkerów ma on wartości powyżej 10. Pozostałe kanały optyczne o porównywalnej różnicy charakteryzują się niskimi wartościami DU.

Dla kanałów optycznych 730 nm i 640 nm tworzymy wskaźnik ilorazowy  $\xi_{730\text{ nm}, 640\text{ nm}}$ , otrzymując dla H<sub>2</sub>O przewidywaną wartość 5,000 dla CO<sub>2</sub> 0,286.

### 3.1.2. Wynik teoretyczny dla eksperymentu walidacyjnego

Analogiczną analizę przeprowadzono dla eksperymentu, w którym przyjęto  $t_{EXP} = 5$  ms, i GAIN = 300. Wyniki przedstawiono w tabeli 3 (b). Najbardziej odpowiednim zakresem (spośród analizowanych filtrów) do prowadzenia detekcji składu pióropuszy



**Rys. 5. Średnia wartość piksela [DU] rejestrowana podczas eksperymentu w sześciu kanałach spektralnych: 0,46 μm (niebieski), 0,55 μm (zielony), 0,64 μm (czerwony), 0,73 μm (bordowy), 0,82 μm (fioletowy) i 0,88 μm (szary) dla warstwy H<sub>2</sub>O (wykres górny) lub CO<sub>2</sub> (wykres dolny) na ciemnym (b < 0,05) tle**  
 Fig. 5. Average pixel values [DU] registered during experiment in six optical channels: 0.46 μm (blue), 0.55 μm (green), 0.64 μm (red), 0.73 μm (granate), 0.82 μm (violet) and 0.88 μm (grey) for H<sub>2</sub>O layer (up) and CO<sub>2</sub> (down) on dark (b < 0.05) background

gazowych jest również zakres 730 nm rozumiany jako przedział od 725 nm do 735 nm. Różnice odczytów wynikające z odbicia promieniowania oświetlenia od pióropusza gazowego składającego się z dwutlenku węgla (100% składu) lub pary wodnej (100% składu) wynoszą 74 ( $DU$ ).

Dla kanałów optycznych 730 nm i 640 nm tworzymy wskaźnik ilorazowy  $\xi_{730nm, 640nm}$  otrzymując dla  $H_2O$  przewidywaną wartość 5,267, a dla  $CO_2$  – wartość 0,263.

### 3.2. Wynik eksperymentu walidacyjnego

Na rysunku 5 przedstawiono różnice odczytów zaobserwowane podczas eksperymentu w poszczególnych zakresach spektralnych wybranych do eksperymentu dla obserwacji pióropusza gazowych złożonych z dwutlenku węgla (100% składu) lub pary wodnej (100% składu) dla ciemnego tła ( $b < 0,05$ ).

Średnie zarejestrowane wartości  $DU$  dla obu biomarkerów z ich odchyleniami standardowymi przedstawiono w tabeli 4.

W ostatnim wierszu tabeli 4 podano wartość testu  $3\sigma$  dla średnich wartości  $\xi$  i ich odchyłeń wg wzoru 6.

## 4. Omówienie wyników i dyskusja

### 4.1. Zgodność wyników eksperymentu z modelem reflektancji

Porównując wyniki obliczeń teoretycznych (tab. 3b) z wynikami eksperymentu (tab. 4) można przyjąć następujące obserwacje.

– Dla strumienia pary wodnej średnie wartości  $DU$  dla wszystkich kanałów, oprócz 0,73  $\mu m$ , są niższe niż w przewidywaniach teoretycznych, jednak są ze sobą zgodne, jeśli zostaną uwzględnione obliczone odchylenia standardowe dla eksperymentu poza kanałami 0,73  $\mu m$  i 0,82  $\mu m$ . Dla kanału 0,73  $\mu m$  teoretyczna wartość piksela (79  $DU$ ) jest o 1  $DU$  mniejsza niż uzyskana średnia minus  $1\sigma$ . Dla kanału 0,82  $\mu m$  rozbieżność jest bliska  $2\sigma$ . Zarejestrowana wartość nie odzwierciedla przewidywanej w modelu wyższej reflektancji w zakresie 0,81–0,83  $\mu m$  (rys. 2, trzecie minimum transmitancji dla  $H_2O$ ). Prawdopodobną przyczyną tej rozbieżności jest bardzo niska wartość

sumarycznej efektywności kwantowej układu optycznego dla tego kanału ( $\sim 5\%$ ).

– Dla strumienia dwutlenku węgla zarejestrowane wartości są niższe niż wynikające z obliczeń teoretycznych, jednak można zauważyć, że dla zakresu 0,46–0,73  $\mu m$  są ze sobą silnie skorelowane (+99,7%). Świadczy to o użyciu w eksperymencie innej gęstości dwutlenku węgla w strumieniu niż w modelowaniu, jednak występujące w modelu rozpraszanie Rayleigha w krótkich falach zostało odzwierciedlone w danych doświadczalnych. W związku z brakiem filtra optycznego 0,76–0,78  $\mu m$  w danych nie można zauważyć największego z minimum transmitancji w badanym zakresie. Podobnie jak w przypadku pary wodnej wartości kanałów  $> 0,8 \mu m$  odbiegają od modelu. Prawdopodobną przyczyną tej różnicy jest niska sumaryczna efektywność kwantowa.

Dane doświadczalne potwierdziły inną odpowiedź spektralną strumieni  $H_2O$  i  $CO_2$  w kanale 0,73  $\mu m$ . Spośród sześciu kanałów badanych w eksperymencie jest to jedyny kanał, dla którego test  $3\sigma$  zarejestrowanych wartości  $DU$  dla pary wodnej i dwutlenku węgla wypadł pomyślnie. Wynik ten jest zbliżony z przewidywaniami teoretycznymi. Możliwość spektralnej separacji strumieni za pomocą kanału 0,82  $\mu m$  nie mogła być potwierdzona w tym eksperymencie ze względu na niską sumaryczną efektywność kwantową stosowanego sensora.

### 4.2. Wartości brzegowe parametrów użytecznej w projektowanej misji kamery wielospektralnej

Na podstawie przeprowadzonej kalibracji radiometrycznej kamery wielospektralnej wyznaczono zestaw parametrów granicznych dla obserwacji gazów z dokładnością 2% na orbicie Enceladusa:

- $V = < 200$  m/s,
- $t_{EXP} = 12$  ms,
- szerokość spektralna filtrów optycznych = 20 nm,
- iloczyn czułości układu optycznego i względnych różnic reflektancji rejestrowanych obiektów  $\geq 2,5\%$ ,
- fizyczna powierzchnia pojedynczego piksela  $\geq 3,75 \cdot 3,75 \mu m^2$ ,
- możliwości absorpcyjne pojedynczego piksela  $\geq 12 \cdot 400^{PHOTON}$ ,
- zapis danych: co najmniej 8-bitowy.

Tabela 4. Średnie wartości  $DU$  i  $\xi_{730nm, \lambda}$  dla obu typów strumieni fotografowanych na ciemnym tle w sześciu kanałach optycznych, ich odchylenia standardowe, różnica w odczycie i wartość testu  $3\sigma$

Table 4. Average pixel values  $DU$  and  $\xi_{730nm, \lambda}$  for both types of gas layers photographed on dark background in six optical channels, standard deviations, differences between water and carbon dioxide and  $3\sigma$  test values

Biomarker	Zakres spektralny	0,46 $\mu m$	0,55 $\mu m$	0,64 $\mu m$	0,73 $\mu m$	0,82 $\mu m$	0,88 $\mu m$
$H_2O$	DU	14,59	12,86	12,75	86,74	12,79	13,11
	Std. Dev.	1,21	1,33	1,38	0,84	1,28	1,25
	$\xi$	5,95	6,74	6,80	–	6,78	6,62
	Std. Dev.	0,50	0,70	0,74	–	0,68	0,63
$CO_2$	DU	22,85	17,30	12,26	7,87	18,62	21,63
	Std. Dev.	1,01	0,83	0,44	0,85	0,51	0,24
	$\xi$	0,34	0,45	0,64	–	0,42	0,36
	Std. Dev.	0,04	0,05	0,07	–	0,05	0,04
	$ \xi_{H_2O} - \xi_{CO_2} $	5,60	6,29	6,16	–	6,36	6,25
	Test $3\sigma$	11,25	8,95	8,29	–	9,30	9,84

Parametry mogą być dowolnie modyfikowane, należy jednak pamiętać o zachowaniu odpowiednich relacji między nimi. Przeprowadzony eksperyment potwierdził, że optyczne obserwacje wielospektralne już teraz mogą być z powodzeniem stosowane do operacyjnej detekcji składu mieszanek gazowych.

## 5. Wnioski

Detekcja udziału poszczególnych biomarkerów w pióropuszcach gazowych jest możliwa za pomocą kamery wielospektralnej o parametrach przewidzianych w projektowanej misji Enceladus Orbiter. Możliwość rozróżnienia gęstości składników jest zależna przede wszystkim od parametrów kamery oraz obliczonych różnic refleksyjności gazów w wybranych zakresach spektralnych. Podczas prac eksperymentalnych wyznaczono zakres 0,73  $\mu\text{m}$  jako optymalny do rozróżnienia udziału procentowego mieszanki gazowej, w skład której wchodzi dwutlenek węgla oraz para wodna. Należy zauważyć, że wyznaczony zakres nie był dotychczas rejestrowany w obrazowaniach kamerami typu MVIC (ang. *Multispectral Visible Imaging Camera*). W celu zaaplikowania proponowanej metodyki należałoby uwzględnić ten kanał optyczny w konfiguracji kamery ze standardową optyką MAC (ang. *Medium-Angle Camera*). Ze względu na to, że w badaniach laboratoryjnych przyjęto bardzo wąskie kanały optyczne i w związku z tym wynikowy kanał optyczny jest również kanałem wąskim, aplikacja wypracowanej metody w szerokich kanałach optycznych może okazać się problematyczna. W związku z tym należałoby zwrócić uwagę na możliwość konfiguracji kamery MAC w misji Enceladus Orbiter z uwzględnieniem węższych spektralnie filtrów optycznych niż stosowane dotychczas w kamerach MVIC. Nawet przy zastosowaniu filtrów optycznych o szerokości zaledwie 20 nm, zapis wartości  $DU$  na 8 bitach przy głębokości studni potencjału sensora wynoszącej  $6900\text{e}^-$  możliwa jest detekcja składu pióropuszczy z dokładnością około 2%. Przy zapisie 10-bitowym możliwa jest detekcja z dokładnością względną około 0,5%. Przeprowadzone w ten sposób oszacowanie składu pióropuszczy może istotnie zwiększyć wiedzę o ich zmienności chemicznej i fizycznej i w ten sposób pomóc odpowiedzieć na pytanie o przyczyny ich występowania.

## Podziękowania

Autorzy dziękują Instytutowi Lotnictwa za pomoc w przeprowadzeniu badań oraz dr. Arvind Singh z Banaras Hindu University za konsultacje dotyczące sygnatur spektralnych refleksyjności biomarkerów.

## Bibliografia

1. Berk A., Conforti P., Kennett R., Perkins T., Hawes F., van den Bosch J., *MODTRAN6: a major upgrade of the MODTRAN radiative transfer code*. [w:] *Proceedings SPIE 9088, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XX*, 90880H (June 13, 2014); DOI: 10.1117/12.2050433.
2. Bouquet A., Mousis O., Waite J.H., Picaud S., *Possible evidence for a methane source in Enceladus' ocean*. „Geophysical Research Letters”, Vol. 42, Iss. 5, 2015, 1334–1339, DOI: 10.1002/2014GL063013.
3. Czapski P., Kacprzyk M., Korniluk T., Kotlarz J., Kubiak K., Mazur A., Mrowiec K., Oszako T., Pieniżek J., Pośpieszczyk A., Tkaczyk M., Wodziński K., Zalewska N., *Budowa i zastosowanie platformy wielosensoro-*

*wej w badaniu wybranych parametrów środowiska*. „Prace Instytutu Lotnictwa”, Nr 1 (234) March 2014, 126–142.

4. Fujishima K., Dziomba S., Takahagi W., Shibuya T., Takano Y., Guerrouache M., Carbonnier B., Takai K., Rothschild L., Yano H., *A Fly-Through Mission Strategy Targeting Peptide as a Signature of Chemical Evolution and Possible Life in Enceladus Plumes*. 2016.
5. Hansen C., Esposito L., Colwell J., Hendrix A., Portyankina G., Shemansky D., West R., *Deriving the Structure and Composition of Enceladus' Plume from Cassini UVIS Observations*. „AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts”. Vol. 47, 2015.
6. Hedman M.M., Gosmeyer C.M., Nicholson P.D., Sotin C., Brown R.H., Clark R.N., Baines K.H., Buratti B.J., Showalter M.R., *An observed correlation between plume activity and tidal stresses on Enceladus*. „Nature”, 500.7461, 2013, 182–184, DOI: 10.1038/nature12371.
7. Howett C.J.A., Parker A.H., Olkin C.B., Reuter D.C., Ennico K., Grundy W.M., Lovering J.R., *Inflight Radiometric Calibration of New Horizons' Multispectral Visible Imaging Camera (MVIC)*. arXiv preprint arXiv:1603.08940, 2016.
8. Hurford T., Bruce B., Helfenstein P., Greenberg R., Hoppa G., Hamilton D., DPS meeting #40, id.8.06; „Bulletin of the American Astronomical Society”, Vol. 40, 399, 09/2008.
9. Ingersoll A.P., Shawn P.E., *Decadal timescale variability of the Enceladus plumes inferred from Cassini images*. „Icarus”, Vol. 282, 2017, 260–275, DOI: 10.1016/j.icarus.2016.09.018.
10. Kurczyński Z., *Fotogrametria*, PWN, Warszawa 2014.
11. Lefevre, A., Tobie G., Choblet G., Cadek O., Mitri G., Massé M., Behoukova M. *Enceladus' internal ocean constrained from Cassini gravity and topography data*. European Planetary Science Congress 2015, held 27 September-2 October, 2015 w Nantes, Francja, On-line: <http://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2015>, id. EPSC2015-803. Vol. 10. 2015.
12. Mahaffy, Paul R., et al. *The sample analysis at Mars investigation and instrument suite*. „Space Science Reviews”, Vol. 170, Iss. 1–4, 2012, 401–478.
13. Patthoff D.A., Kattenhorn S.A., *A fracture history on Enceladus provides evidence for a global ocean*. „Geophysical Research Letters”, Vol. 38, Iss. 18, 2011, DOI: 10.1029/2011GL048387.
14. Perry M.E., et al. *Cassini INMS measurements of Enceladus plume density*. „Icarus”, Vol. 257, 2015, 139–162, DOI: 10.1016/j.icarus.2015.04.037.
15. Poinot P., Geffroy-Rodier C., *Searching for organic compounds in the Universe*. „TrAC Trends in Analytical Chemistry”, Vol. 65, 2015, 1–12, DOI: 10.1016/j.trac.2014.09.009.
16. Porco, Carolyn C., et al. *Cassini imaging science: Instrument characteristics and anticipated scientific investigations at Saturn*. „Space Science Reviews”, Vol. 115, Iss. 1–4, 2004, 363–497.
17. Porco C. C. et al. (2006) *Cassini Observes the Active South Pole of Enceladus*, „Science”, 311, Iss. 5766, 1393–1401. DOI: 10.1126/science.1123013
18. Spencer J.R., Pearl J.C., Segura M., Flasar F.M., Mamoutkine A., Romani P., Buratti B.J., Hendrix A.R., Spilker L.J., Lopes R.M.C., *Cassini Encounters Enceladus: Background and the Discovery of a South Polar Hot Spot*. „Science”. Vol. 311, Iss. 5766, 2006, 1401–1405, DOI: 10.1126/science.1121661.



19. Spencer J.R., *Planetary Science Decadal Survey Enceladus Orbiter, Mission Concept Study*, [http://sites.nationalacademies.org/cs/groups/ssbsite/documents/webpage/ssb\\_059320.pdf](http://sites.nationalacademies.org/cs/groups/ssbsite/documents/webpage/ssb_059320.pdf)
20. Stockton, Amanda M., Tjin C.C., Huang G.L., Benhabib M., Chiesl T.N., Mathies R.A., *Analysis of carbonaceous biomarkers with the Mars Organic Analyzer microchip capillary electrophoresis system: aldehydes and ketones*. „Electrophoresis” 31.22, 2010, 3642–3649, DOI: 10.1002/elps.201000424.
21. Thomas P.C. et al. *Enceladus’s measured physical libration requires a global subsurface ocean*, „Icarus”, Vol. 264, 15 January 2016, 37–47. DOI: 10.1016/j.icarus.2015.08.037.
22. Tunncliffe V., *The Biology of Hydrothermal Vents: Ecology and Evolution*. „Oceanography and Marine Biology an Annual Review”. 29, 1991, 319–408.
23. Waite J.H. Jr, et al. *Cassini ion and neutral mass spectrometer: Enceladus plume composition and structure*. „Science”, 311.5766, 2006, 1419–1422, DOI: 10.1126/science.1121290.
24. Waite J.H. Jr, et al. *Liquid water on Enceladus from observations of ammonia and  $40\text{Ar}$  in the plume*. „Nature”, 460.7254, 2009, 487–490.
25. Zolotov Mikhail Y. *An oceanic composition on early and today’s Enceladus*. „Geophysical Research Letters”, Vol. 34, Iss. 23, 2007, DOI: 10.1029/2007GL031234.

## Detection of Biomarkers in Gas Plumes Using a Multi-Spectral Camera in the Proposed Enceladus Orbiter Mission (NASA)

**Abstract:** The cause of the cryovolcanic activity on the Enceladus south hemisphere and related to this activity gas plumes are one of the biggest mysteries of the outer solar system moons. The possibility of the existence of the ocean under Enceladus icy outer layer was confirmed through direct chemical plumes composition measurement during Cassini close flyby 168.2 km over moon’s surface. Three out of the four main plumes components are standard biomarkers ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$ ). Physical plumes parameters variability observed also by Cassini, possibility of drawing conclusions about cryovolcanic activity reasons and biotic causes of biomarkers presence in plumes are important reasons of new, dedicated to Enceladus observation, NASA’s mission development. In this paper we are asking about possibility of Enceladus plumes chemical components analysis using multispectral imaging by projected for this new mission sensors. We chose band  $0.73\ \mu\text{m}$  for  $\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CO}_2$  distinguish using theoretical transmittance gas layers analysis and physical radiation transmittance through gas layer visible on the background material with defined constant reflectance model. In order to validate this result an experiment was conducted. Using multispectral camera Quercus.6 we photographed  $\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CO}_2$  gas layers visible on the high ( $> 0.95$ ) and low ( $< 0.05$ ) visible light and NIR reflectance backgrounds. The results confirmed theoretical spectral transmittance analysis of those two biomarkers. Based on this result we established boundary parameters of the sensor and optical system projected for the orbiter allowing relative content of the biomarkers estimation with precision up to 2%: optical band  $\lambda = 0.730 (\pm 0.020)\ \mu\text{m}$ , relative velocity between orbiter and moon  $v < 200\ \text{m/s}$ , exposition time  $t_{\text{EXP}} < 12\ \text{ms}$ , quantum efficiency of the whole optical system and two biomarkers in selected wavelength reflectance difference product  $\geq 2,5\%$ , single CCD pixel physical size  $\geq (3,75 \cdot 3,75)\ \mu\text{m}^2$ , potential well depth for one CCD pixel  $\geq 12\ 400\ \text{e}^-$ , RAW data record at least 8-bit. Optimal result waveband wasn’t recorded before using MVIC optical systems during past missions. If we want to apply proposed in this paper biomarkers distinguish methodology one out of four optical channels of the MAC camera projected for the new mission should cover also selected wavelength.

**Keywords:** Enceladus, biomarkers, multispectral analysis, sensors

## dr Natalia Zalewska

natalia.zalewska@ilot.edu.pl

Pracuje w Instytucie Lotnictwa oraz Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk, jest specjalistką w zakresie badań geologicznych Marsa, prowadzonych na podstawie danych z satelitów Mars Express i MRO. W latach 2005 i 2017 brała udział w analogowej misji na tej planecie, zorganizowanej przez Mars Society, która odbywała się w bazie marsjańskiej na pustyni w stanie Utah. Obecnie zajmuje się zagadnieniami poszukiwania wody na powierzchni Marsa. Jest zaangażowana w popularyzację kosmosu przez współpracę z mediami.



## Jan Kotlarz

jan.kotlarz@uw.edu.pl

Studiuje astronomię na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. W latach 2012–2017 pracował w Zakładzie Teledetekcji Instytutu Lotnictwa, kierując projektem HESOFF. W 2009 r. był nominowany do nagrody Travelery przez National Geographic w kategorii naukowe osiągnięcie roku za stworzenie algorytmu generującego trójwymiarowe modele powierzchni Marsa na podstawie analiz topologicznych. Od 2017 r. w Centrum Fizyki Teoretycznej PAN pod kierunkiem prof. Bożeny Czerny zajmuje się fotometrią kwazarów na podstawie zdjęć z teleskopu SALT.



## mgr inż. Mariusz Kacprzak

mariusz.kacprzak@ilot.edu.pl

Absolwent Politechniki Warszawskiej, podczas wymiany studenckiej uczestniczył w zajęciach na Uniwersytecie Technicznym w Wiedniu (TU Wien). Od 2013 r. pracuje w Instytucie Lotnictwa gdzie zajmuje się pozyskiwaniem i przetwarzaniem zdjęć lotniczych. Jego zainteresowania naukowe dotyczą praktycznego wykorzystania zdalnie sterowanych statków powietrznych (RPAS, UAV).



## mgr inż. Tomasz Korniluk

tomasz.korniluk@ilot.edu.pl

Ukończył studia na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej. Zajmuje się tworzeniem oprogramowania systemów wbudowanych. Od 2012 r. zatrudniony w Instytucie Lotnictwa. Pracował w zespole konstrukcyjnym kamery wielospektralnej Quercus 6.

