JAN KOTLARZ¹, NATALIA ZALEWSKA^{1,2}

¹*Zakład Teledetekcji*

Instytut Lotnictwa

Al. Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa

²*Centrum Badań Kosmicznych PAN*

Bartycka 18A, 00-716 Warszawa

E-mail: jan.kotlarz@ilot.edu.pl

natalia.zalewska@ilot.edu.pl

CHARAKTERYSTYKA SPEKTRALNA EGZOPLANET O LEŚNYM TYPIE POWIERZCHNI W ZAKRESIE WIDZIALNYM I PODCZERWIENI. STAN WIEDZY PRZED ROZPOCZĘCIEM OBSERWACJI PRZEZ TELESKOP JWST

WSTĘP

Obecnie w najbliższym sąsiedztwie Słońca prawie 4.000 zidentyfikowanych planet krąży wokół swoich macierzystych gwiazd (CLAUDI 2017). Ponieważ planety są w porównaniu do towarzyszących im gwiazd bardzo ciemnymi obiektami astronomicznymi, jedynie znikoma część z nich (ok. 3%) została zaobserwowana w sposób bezpośredni (OLLIVIER i MAUREL 2014, CHAKRABARTI i współaut. 2016). Najbardziej popularne sposoby detekcji i pozyskania danych dotyczących parametrów fizycznych egzoplanet opierają się na metodach pośrednich, takich jak: fotometria tranzytów na tarczy gwiazd, analiza prędkości radialnych gwiazd spowodowanych oddziaływaniem grawitacyjnym planet oraz mikrosoczewkowanie grawitacyjne (UDALSKI i współaut. 2005).

Chociaż podstawowa charakterystyka, zawierająca masę, promień, gęstość, odległość od gwiazdy (FITZPATRICK i współaut. 2016), a także skład chemiczny atmosfery (PARMENTIER i współaut. 2015) dla planet odkrytych metodą tranzytu jest w obecnym stanie wiedzy możliwa do określenia, to nadal stosowane w detekcji metody pośrednie uniemożliwiają lub utrudniają określenie pokrycia terenu tych planet za pomocą analizy wielospektralnej (ZALEWSKA 2013). Pośród stosowanych w modelach spektralnych typów powierzchni, takich jak: planety skaliste, gazowe, lodowe i oceaniczne (FUJII i współaut. 2017), swoje

miejsce znalazł leśny i częściowo leśny typ powierzchni (SCHWIETERMAN i współaut. 2015, WEI S. i współaut. 2017). Jednym z celów planowanej na kwiecień 2019 r. misji JWST (teleskop Jamesa Webba; ang. James Webb space telescope) jest właśnie detekcja biosfer egzoplanet, w tym powierzchni podobnych spektralnie do leśnych powierzchni na Ziemi, w obrębie skalistych egzoplanet (KASTING i współaut. 2014).

Pierwsze koncepcje obserwatoriów egzoplanet podobnych do Ziemi, umieszczanych na orbicie okołozemskiej, wokół punktu libracyjnego L_2 (1,5 miliona km od Ziemi) lub okołosłonecznej, formułowane były już w latach 90. XX w. (DRESSLER i współaut. 1996). Po 2000 r. podjęto wiele prób określenia prawdopodobnego wpływu powierzchni pokrytych biomasa oraz gazowych produktów procesów spełniających taką samą funkcję co fotosynteza na Ziemi, na obserwacje wielospektralne egzoplanet, które będą prowadzone w przyszłości przez JWST. Celem tej publikacji jest zestawienie wyników dotyczących tego typu powierzchni i odpowiedź na pytanie, czy i w jaki sposób teledetekcyjna wiedza o lasach na Ziemi może być zaaplikowana do algorytmiki analizy danych spektralnych pod kątem poszukiwania egzoplanet o leśnym typie powierzchni, za pomocą danych pozyskanych w przyszłości przez JWST w świetle widzialnym i podczerwieni (0,6–5,0 μm).

Słowa kluczowe: biosygnatury, egzoplanety, fotosynteza, JWST, red edge, teledetekcja

METODYKA DETEKCJI BIOSYGNATUR

Planety i księżycy mogące być miejscami o sprzyjających warunkach dla rozwoju biosfer; muszą spełniać ściśle zdefiniowane warunki. Po pierwsze, muszą znajdować się w odległości od gwiazdy umożliwiającej obecność wody w stanie płynnym. Na bazie wody lub potencjalnie innej substancji w stanie ciekłym musi występować cykl analogiczny do cyklu hydrologicznego na Ziemi. Planetom, które nie spełniają powyższych warunków (np. są zbyt daleko od gwiazdy, nie posiadają atmosfery itp.) przypisywane jest małe prawdopodobieństwo istnienia na nich biosfer. Należy podkreślić, że oprócz promieniowania gwiazd, możliwe są inne źródła energii powodujące istnienie wody w stanie ciekłym, a nawet oceanów pokrywających całe ciało niebieskie (np. energia pływowa dla Europy, księżyc Jowisza). Dla pozostałych obiektów zasadna jest realizacja zaawansowanego przetwarzania danych wielospektralnych mogących określić warunki atmosferyczne (gęstość, skład chemiczny), separację obszarów o różnym typie powierzchni oraz przeprowadzić detekcję zmian w czasie w atmosferze i na powierzchni. Na podstawie parametrów fizycznych planet i ich gwiazd można zaproponować modele opisujące procesy na planecie wraz z przypisanymi im biosygnaturami występującymi jako elementy powierzchni lub składnik atmosfery.

DEFINICJA BIOSYGNATURY W ASTROBIOLOGII

Definicje biosygnatur są bardzo szerokie pod względem pojęciowym. Jedną z najwcześniejszych zaproponowano w pracy DES MARAIS i współaut. (2002), określając ją jako cechę zróżnicowania natężenia promieniowania elektromagnetycznego w różnych zakresach spektralnych lub polaryzacjach, którego przyczyną mogą być produkty życia biologicznego. Współcześnie przyjmuje się, że jest to obfitość składników atmosferycznych, typów pokrycia powierzchni lub nawet znaczne zróżnicowanie samej sygnatury spektralnej refleksyjności powierzchni planety (SCHWIETERMAN i współaut. 2017). W ostatnich latach bardziej skupiono się na poszukiwaniu potencjalnych produktów dowodzących istnienia biosfer w atmosferach planet, ze względu na trudność detekcji parametrów samych powierzchni. Detekcja charakterystycznych cech sygnatur spektralnych dla np. tlenu lub dwutlenku węgla była prowadzona również w Układzie Słonecznym podobnymi technikami (ZALEWSKA i współaut. 2017). Można przyjąć, że biosygnaturą jest „przedmiot, substancja lub wzorzec spektralny i/lub czasowy, którego pochodzenie

wymaga czynnika biologicznego” (DES MARAIS i współaut. 2008). Biosygnatury możemy podzielić na: gazowe [np. tlen cząsteczkowy (O_2) wytwarzany jako produkt uboczny fotosyntezy, a następnie poprzez reakcje fotochemiczne przekształcany w ozon (O_3) w stratosferze], powierzchniowe [np. „red edge” - wzorzec spektralny zakładający zróżnicowanie refleksyjności przez liście roślin w paśmie czerwonym i bliskiej podczerwieni (ang. near-infra red, NIR)] oraz mające charakter zmienności w czasie (np. zmiana stężenia gazu w atmosferze lub zmiana albedo powierzchni, gdy można je uzasadnić reakcją biosfery na sezonową lub dobową zmianę warunków na planecie). Trzeba pamiętać, że tego typu definicja może skutkować podniesieniem prawdopodobieństwa fałszywego alarmu i jest kwestionowana przez część środowiska astrobiologów (SCHWIETERMAN i współaut. 2017).

FIZYCZNE WARUNKI DLA MAS I ORBIT EGZOPLANET

Zakłada się, że aby na planecie mogła występować biosfera, musi ona być ułożona w przedziale odległości od gwiazdy umożliwiającej stałą obecność wody w stanie ciekłym (ang. habitable zone, HZ). Odległość ta zależy od składu atmosfery, masy planety i typu gwiazdy (KOPPARAPU i współaut. 2013). Dla gwiazd ciągu głównego i masy planet porównywalnej do Ziemi oszacowano dopuszczalne granice w punktach odpowiadających parowaniu wody (granica wewnętrzna) oraz kondensacji CO_2 (granica zewnętrzna) na odpowiednio 0,95 AU (ang. astronomical unit) i 1,37 AU (KASTING i współaut. 1993) lub 0,99 AU i 1,70 AU (KOPPARAPU i współaut. 2013). Porównanie efektywnej temperatury gwiazd i pól orbity egzoplanet przedstawia Ryc. 1.

Większość opracowań dotyczących tego tematu zakłada dodatkowo dwa parametry: atmosferę typu N_2 - CO_2 - H_2O i obecność cyklu węglanowo-krzemianowego. Jest oczywiste, że dostępność wody jest kluczowym aspektem również dla istnienia i funkcjonowania ekosystemów leśnych. Zarówno badania lasów tropikalnych w dorzeczu Amazonki w 2005 r. i 2010 r., jak również badania wpływu suszy 2015 r. w Polsce na drzewostan dębowy wykazały stosunkowo niewielki niedobór wody, jako przyczynę wzrostu śmiertelności drzew, zauważalnej zmiany refleksyjności całych kompleksów leśnych w paśmie NIR i poziomu wykorzystania atmosferycznego CO_2 (DOUGHTY i współaut. 2015, NASIŁOWSKA i współaut. 2016). Precyzja w wyznaczeniu orbity planety, strumienia promieniowania gwiazdy w powiązaniu z warunkami atmosferycznymi (np. występowaniem

Ryc. 1. Zestawienie temperatur efektywnych T_{eff} gwiazd, odległości planet od gwiazd i ich mas w kontekście minimalnej i maksymalnej dopuszczalnej odległości dla której na planecie może istnieć woda w stanie ciekłym (Habitable Zone, HZ). Dodatkowo zaznaczono Wenus, Ziemię i Marsa (źródło: dane dotyczące egzoplanet: exoplanets.org, dane dotyczące Marsa, Ziemi i Wenus: opracowanie własne).

zachmurzenia) jest zatem kluczowa dla wyznaczenia potencjalnych kandydatów do obserwacji pod względem obecności tak wrażliwych ekosystemów, jak ekosystem leśny.

ATMOSFERA

Zakłada się, że detekcja biosygnatur spektralnych wymaga modelowania widm będących sumą promieniowania odbitego, emitowanego lub pochłoniętego przez egzoplanety (BERDYUGINA i KUHN 2017). Jednym z najprostszych podejść jest detekcja gazów biogennych, która może wstępnie klasyfikować kandydatów wartych dalszej obserwacji (GRENFELL i współaut. 2013). Modele atmosfer planet odpowiednich dla biomasy dzielą się na dwa scenariusze. W pierwszym mo-

delu atmosfera jest typu ziemskiego, tzn. zdominowana przez N_2 , CO_2 i H_2O . Tlen cząsteczkowy O_2 może, ale nie musi być znaczącym składnikiem atmosfery. Bardziej ogólnie, w atmosferze muszą występować trzy składniki: gaz cieplarniany ulegający kondensacji, nie ulegający kondensacji oraz gaz będący „tłem” (MARCQ i współaut. 2017). Alternatywne modele przypisane raczej dla planet o masie rzędu od kilku mas Ziemi do masy Neptuna zawierają przede wszystkim wodór cząsteczkowy (H_2) wraz z niewielką domieszką CO_2 . Należy zauważyć, że na Ziemi ten typ wodoru znaleźć można przede wszystkim w górnych warstwach atmosfery i chociaż jego źródłem są przede wszystkim reakcje fotochemiczne z udziałem metanu i innych węglowodorów, to również jego naturalnym źródłem mogą być: spalanie biomasy i odgazowanie oceanów (RAHN i współaut. 2002).

W ziemskim modelu atmosfery możemy wyróżnić biosygnatury pochodzące z ekosystemów leśnych bezpośrednio (np. tlen, będący produktem fotosyntezy) lub pośrednio (np. ozon, będący efektem reakcji fotochemicznej tlenu w stratosferze). Nie wszystkie gazowe biosygnatury są pochodzenia wyłącznie biologicznego, dlatego uznanie ich w przyszłości jako dowodu pośredniego istnienia ekosystemów leśnych na planetach będzie zależało od kontekstu środowiskowego egzoplanety (MEADOWS i współaut. 2017).

Najważniejszymi biosygnaturami typu atmosferycznego są: O_2 , O_3 , N_2O , CH_4 , CH_3Cl , C_2H_6 , NH_3 , siarczki dimetylu (DMS), disulfid dimetylu (DMDS) i CH_3SH (SCHWIETERMAN i współaut. 2017). Trzeba podkreślić, że w ziemskich ekosystemach leśnych proces emisji azotynów, a szczególnie rola materii organicznej i kwasów huminowych w glebie, nie są jeszcze do końca poznane (WEI J. i współaut. 2017). Metan jest na Ziemi efektem metabolizmu beztlenowego drobnoustro-

Ryc. 2. Intensywności ($cm^{-1}/mol\ cm^{-2}$) linii absorpcji biosygnatur: O_2 (czerwony), N_2O (czarny), CH_4 (zielony), NH_3 (niebieski). Źródło: baza danych HITRAN 2012/opracowanie własne.

jów, natomiast ważnym źródłem metanu są również lasy obszarów mokradeł. Tego typu emisja może stanowić nawet 27% sezonowej emisji CH_4 w ekosystemach w umiarkowanych podmokłych lasach, przy największym udziale wiosną i zimą (PANGALA i współaut. 2015). Rośliny tropikalne i podzwrotnikowe są głównym źródłem chlorometanu w atmosferze (KOLUSU i współaut. 2018), natomiast etan, amoniak i wodór cząsteczkowy mogą być efektem pożarów lasów (LUTSCH i współaut. 2016). Dodatkowo, amoniak jest naturalnym produktem procesu transpiracji szparkowej (HANSEN i współaut. 2017).

Detekcja wszystkich powyższych biosygnatur może być prowadzona zarówno w paśmie widzialnym, jak i w podczerwieni. Sygnatury spektralne absorpcji wybranych związków w zakresie 0,4–10,0 μm przedstawia Ryc. 2.

WODA W STANIE CIEKŁYM

Sama obecność planety w HZ nie jest wystarczająca do stwierdzenia, że jest na niej obecna woda w stanie ciekłym umożliwiającą istnienie biosfery. Przykładem tego typu planety jest chociażby Mars. Czerwona planeta wraz z Ziemią znajdują się w HZ Układu Słonecznego. Pory roku, takie jak na Ziemi, mogłyby sprzyjać powstaniu życia. Dodatnia temperatura dochodząca w strefie równikowej do 30° oraz czas trwania doby ($24^{\text{h}}39^{\text{m}}$) skłaniają do spekulacji na temat istnienia życia na tej planecie. Jednak istnieje decydujący czynnik, który poważnie utrudnia jego rozwój: brak ciekłej wody. Niestety, ciśnienie atmosferyczne na Marsie jest tak niskie (~ 6 mbar), że uniemożliwia istnienie wody w tej postaci. Chociaż słaba atmosfera (CO_2) mogłaby stanowić dogodne środowisko dla organizmów żywych, to brak pola magnetycznego naraża potencjalne organizmy na promieniowanie kosmiczne, a w konsekwencji na śmierć.

W ramach programu VIKING w latach 70. XX w. lądowniki, które badały skład chemiczny gruntu marsjańskiego, nie dostarczyły żadnych wyników świadczących o występowaniu życia. Badania te na podstawie przesłanych zdjęć dowodziły występowania kanałów na Marsie. Gdyby tymi kanałami płynęła kiedyś woda, to potencjalnie byłyby one korzystnym środowiskiem do rozwoju ekosystemów. Ostatnie badania łazika Curiosity wykryły śladowe ilości węglodorów na planecie oraz kluczowe składniki chemiczne do życia w glebie, w tym siarkę, azot, wodór, tlen i fosfor (MANNE i współaut. 2017). Niestety, życia nawet uśpionego nie udało się znaleźć do tej pory, a wspomniane kanały w świetle ostatnich badań są prawdopodobnie zastygłymi potokami bardzo

rzadkiej, pierwotnej lawy oraz jej interakcji z lodem (WITEK i CZECHOWSKI 2016). Wynika z tego, że występowanie na obiekcie astrofizycznym form przypominających ziemskie koryta rzek nie jest dowodem na obecność wody w postaci ciekłej na powierzchni planety.

Przykład Marsa pokazuje, że do prawidłowego opisu warunków rozwoju potencjalnych biosfer niezbędna jest detekcja wody w stanie ciekłym w sposób bezpośredni. Najprostszą metodą detekcji dużych zbiorników wodnych byłaby obserwacja błysku, jeśli planeta mogłaby być obserwowana pod względnie dużymi kątami fazowymi (ROBINSON i współaut. 2014). Heterogeniczność ocean-ziemia można również próbować wykryć za pomocą analizy widm w szeregach czasowych o niewielkich interwałach czasowych pomiędzy kolejnymi obserwacjami (COWAN i STRAIT 2013). Zmienność czasowa obserwowanej jasności planet powiązana została w tych pracach z ruchem obrotowym planet i w efekcie zmiennością refleksyjności całej planety, będącej średnią ważoną z refleksyjności trzech typów powierzchni: lodu, łąd i oceanów. Przez analizę statystyczną PCA (ang. principal component analysis) i metody Simplex Shrink-Wrapping i Rotational Unmixing tworzone mogą być południkowe mapy planet, pokazujące przestrzenne zróżnicowanie tych trzech typów powierzchni. Metoda ta została rozwinięta w Zakładzie Teledetekcji Instytutu Lotnictwa i w Instytucie Badawczym Leśnictwa w kontekście detekcji i opisu powierzchni typu leśnego (CZAPSKI i współaut. 2014) oraz jego zróżnicowania, w tym różnorodności gatunkowej (KOTLARZ i współaut. 2016, KOTLARZ i KACPRZAK 2017) oraz wybranych parametrów ekosystemów leśnych: zawartości wody związanej w liściach i w glebie (NASIŁOWSKA i współaut. 2016) i defoliacji (KACPRZAK i współaut. 2018). Metodą pośrednią detekcji zbiorników wodnych jest oszacowanie temperatury powierzchni planety, przez obserwacje prowadzone w kanałach średniej podczerwieni, oraz ciśnienia, przez analizę rozpraszania Rayleigha. Planeta o odpowiedniej temperaturze i ciśnieniu oraz charakteryzująca się obecnością pasm absorpcji H_2O , prawdopodobnie będzie światem sprzyjającym obecności biosfer, w tym ekosystemów leśnych (DES MARAIS i współaut. 2002, ROBINSON 2017).

DETEKCJA POWIERZCHNI LEŚNYCH

Oparta o prace FUHRMANNA (1999) oraz COWANA i STRAITA (2013) metoda separacji typów powierzchni na podstawie danych wielospektralnych, pozwala teoretycznie na detekcję powierzchni typowo leśnych. Ewolucję czasową danych spektralnych EPOXI

Ryc. 3. Dane wielospektralne EPOXI obrazujące Ziemię jako jeden piksel z kolejnych 24 godzin (pełny obrót Ziemi wokół własnej osi) w zakresie 350–950 nm zrzutowane na płaszczyznę głównych składowych PCP (po lewej) oraz naniesione na PCP punkty odpowiadające zrzutowanym sygnaturom spektralnym chmur, łądu i oceanu (COWAN i STRAIT 2013). Dodatkowo zaznaczone przykładowe dane związane z ekosystemami leśnymi: pomiar laboratoryjny sygnatury spektralnej *Quercus Robur* L. za pomocą spektrometru Evolution 220 (KUBIAK i współaut. 2016) oraz średnia refleksyjność drzewostanu iglastego w nadleśnictwie Krotoszyń zmierzona za pomocą sześciokanałowej kamery wielospektralnej podczas lotu fotogrametrycznego w projekcie HESOFF (KOTLARZ i współaut. 2016 – obszar nr 681 na Ryc. 4).

dla Ziemi, potraktowanej jako egzoplaneta i zrzutowanych na przestrzeń głównych składowych (ang. principal component plane, PCP) w trakcie jednej doby, uzupełnione o przykładowe dane spektralne dla różnych typów leśnego pokrycia powierzchni, pozyskane w trakcie projektu HESOFF przedstawia Ryc. 3.

Postępując zgodnie z powyższą metodyką można próbować szukać wzorców spektralnych charakterystycznych dla obszarów leśnych lub dla procesów zachodzących w tego typu ekosystemach. Najważniejszym z nich jest fotosynteza, która napędzana jest w sposób bezpośredni energią macierzystej gwiazdy.

Fotosynteza

Fotosynteza tlenowa jest źródłem najsilniejszej w skali planetarnej biosygnatury na Ziemi. Obecnie nie posiadamy jeszcze ostatecznych wyników badań pokazujących, jak promieniowanie różne od słonecznego wpływa na ten proces, w zakresie powstawania pigmentów takich jak chlorofil -a i -b, oraz

typów gazów wydzielanych do atmosfery jako produktów fotosyntezy. Badania nad fotosyntezą i gazowymi produktami fotosyntezy na egzoplanetach, takich jak O_4 lub CO , prowadzone są obecnie w NASA Astrobiology Institute - Virtual Planetary Laboratory (MEADOWS 2017). Zakładając konieczność istnienia procesu analogicznego do fotosyntezy na Ziemi, jego modelowanie zawierając powinno trzy zasadnicze zjawiska:

1. efekt fotoelektryczny: materiał (pigment) absorbuje foton w ściśle określonym zakresie spektralnym powodując wzbudzenie elektronów;

2. zastąpienie wyrzucanych elektronów, powodujące produkcję biogenicznych produktów przemiany materii z utleniania reduktora;

3. zachowanie energii i jej uwolnienie powodujące emisję ciepła oraz fluorescencję.

Modele określające możliwość i formę procesu fotosyntezy w innych niż ziemskie środowiskach, pozwolą na określenie biosygnatur: pigmentów i gazów biogenicznych (SCHWIETERMAN i współaut. 2017). Bardzo istotnym czynnikiem dla modelowania jest określenie długości fal światła dostępnych od macierzystej gwiazdy. Dla roślin na Ziemi dostępnymi długościami fali światła są pasma widzialne i NIR. Wyjątkiem są tu organizmy żyjące w środowisku wodnym, gdzie spektrum docierającego światła słonecznego jest inne, powodując odmienne właściwości spektralne związane z procesem fotosyntezy (np. STEIGENBERGER i współaut. 2004). Głównymi pigmentami dla ekosystemów leśnych będą tutaj chlorofile typów -a i -b. Ich charakterystyczne maksima absorpcji zawiera Tabela 1.

Model tlenowej fotosyntezy zaproponowanej w pracy WOLSTENCROFTA i RAVENA (2002) przewiduje, że wokół gwiazd karłowatych

Tabela 1. Maksima absorpcji chlorofilu -a i -b.

Pigment	Maksimum absorpcji [μm]		
	Ultrafiolet (UV)	Światło widzialne (VIS)	Bliska podczerwień (NIR)
Chlorofil -a	0,35	0,43, 0,67-0,68	0,70
Chlorofil -b	0,38	0,46	0,65

typu M proces ten mógłby wykorzystywać fotony trzech długości fali światła w podczerwieni, analogicznie do przesunięć *in vivo* u bakterii fotosyntetycznych (np. do 0,76 i 0,90 μm). Gwiazdy typu widmowego M, o masach 0,075–0,5 mas Słońca i temperaturze $\sim 4\,000\text{ K}$, maksimum emisyjności osiąga w granicach 0,75 μm (NIR). Ta właściwość sprawiałaby, że taki model fotosyntezy byłby efektywniejszy.

Wzorzec typu “red edge”

W zakresie ok. 0,7 μm dla zdrowych kompleksów leśnych obserwować możemy zasadniczą zmianę reflektancji pomiędzy maksimum absorpcji chlorofilu -a ($<0,68\text{ }\mu\text{m}$) a maksimum reflektancji związanym z odbiciem światła przez strukturę komórkową liści ($>0,70\text{ }\mu\text{m}$). Wzorzec ten jest powszechnie wykorzystywany w teledetekcji czynników związanych z występowaniem obszarów zalesionych na Ziemi (np. PLUTO-KOSSAKOWSKA i współaut. 2017). Oprócz typowych zastosowań w oparciu o zdjęcia lotnicze i satelitarne (HORLER i współaut. 1983), był on również obserwowany z sondy Galileo oraz w spektrum światła Ziemi odbitego od Księżyca (TURNBULL i współaut. 2006).

Wzorzec ten wydaje się bardzo atrakcyjny dla detekcji dużych, w kontekście planetarnym, obszarów pokrytych roślinnością (głównie lasów). Należy jednak zauważyć, że tego typu marker w spektrum biomasy może występować dla innej niż na Ziemi długości fali światła. Przy modelowaniu procesów fotosyntezy możliwe będzie zdefiniowanie zbioru potencjalnych długości promieniowania elektromagnetycznego, dla których wzorzec ten będzie obserwowalny. Ponadto, dla planet o powierzchni lesistej i dużej zawartości pary wodnej lub innego gazowego produktu fotosyntezy w atmosferze, należy skonfrontować widzialność wynikowej długości fali promieniowania z przezroczystością chmur w tym zakresie. Bezkrzytyczna identyfikacja wzorca typu „red edge” jako lesistego typu powierzchni może powodować podniesienie prawdopodobieństwa fałszywego alarmu. Na Ryc. 4 przedstawiono typowy dla Ziemi kształt sygnatury spektralnej biomasy oraz zawierające podobny wzorzec sygnatury cynobru i siarki.

Niektóre badania wskazują, że wzorce w paśmie NIR byłyby łatwiejsze do detekcji niż występujące w paśmie widzialnym (TINETTI i współaut. 2006).

DETEKCJA ZMIAN W CZASIE

Występowanie znacznych obszarów leśnych na planecie może powodować zmienność obserwowanych biosygnatur zarówno w części gazowej, jak i powierzchniowej.

Ryc. 4. Wzorce typu “red edge” w spektrach reflektancji dla *Quercus robur*: wzorzec widoczny w zakresie 0,70 μm – kolor zielony (KUBIAK i współaut. 2016), siarki: wzorzec widoczny w zakresie 0,40–0,50 μm – kolor niebieski (CLARK i współaut. 2007), cynobru: wzorzec widoczny w zakresie 0,53–0,73 μm – kolor czarny (CLARK i współaut. 2007).

Oscylacja biosygnatur gazowych

Najczęściej wskazywaną biosygnaturą różnicującą się w czasie jest na Ziemi sezonowa zmiana stężenia CO_2 na półkuli północnej: $\sim 10\text{--}20\text{ ppm}$ (ang. parts per million) w stosunku do $\sim 3\text{ ppm}$ zmienności wokół równika (CIAIS i współaut. 1995). Przyczyną tej zmienności jest sezonowa zmiana temperatury i nasłonecznienia, wpływająca na produktywność tego gazu przez biomasę. Zmienność CH_4 jest jedynie częściowo biogenna i bardziej skomplikowana. Detekcja tego typu zmienności na egzoplanetach w skali ziemskiej ($\sim 1\text{--}3\%$ dla CO_2 i CH_4) będzie najprawdopodobniej wykraczać poza możliwości instrumentów zarówno JWST, jak i innych obserwatoriów tego typu w przyszłości.

Oscylacja biosygnatur powierzchniowych

Najważniejszą koncepcją w monitoringu zmian powierzchniowych w skali okresu obiegu planety wokół swojej gwiazdy jest detekcja oscylacji wzorca typu “red edge” (SEAGER i współaut. 2005). Zarówno głębokość pasm absorpcji przez pigmenty, jak i wysokość wzorca “red edge” zmienia się podczas rocznego cyklu wegetacyjnego. Jesienne zmniejszenie intensywności procesu fotosyntezy przez lasy sprawia, że maksima stają się mniej wyraźne, a reflektancja biomasy w zakresie NIR spada (TUCKER 1979, CZAPSKI i współaut. 2015). Ponieważ zmienność

Tabela 2. Wymagania aparatury odpowiedniej do detekcji biosygnatur.

Typ	Biosygnatura	Wymagania		Spełnienie wymagań przez JWST
		zdolność rozdzielcza	rozdzielczość spektralna	
Gazowa	O ₂	Brak wymagań innych niż podczas rejestracji krzywych blasku. Detekcja prowadzona podczas pierwszej i ostatniej fazy tranzytu planety przed tarczą jej gwiazdy	Maksima absorpcyjne: 0,200; 0,445; 0,475; 0,53; 0,57; 0,63; 6,40 (słabe) μm .	Rejestracja maksimów 0,63 i 6,40 μm .
	O ₃		Pasmo absorpcyjne Hartley-Huggins'a w zakresie 0,15-0,35 μm , słabsze pasmo absorpcji w zakresie 0,5-0,7 μm , kilka słabych pasm absorpcyjnych w podczerwieni: 2,05; 2,15; 2,5; 3,3; 3,6; 4,6; i 4,8 μm ; wyraźne pasmo reflektancji w kanale 9,65 μm .	Rejestracja słabego pasma absorpcji 0,5-0,7 μm oraz reflektancji w zakresie 9,65 μm .
	CH ₄		Silne pasma absorpcji 1,65; 2,4; 3,3; i 7-8 μm częściowo pokrywające się z pasmami absorpcji H ₂ O i N ₂ O. Wymagana jest wysoka rozdzielczość spektralna.	Wszystkie pasma absorpcji rejestrowane przez JWST, rozdzielczość spektralna jest zapewniona przez instrumenty NIRSpec i MIRI.
	N ₂ O		Pasma absorpcji 3,7; 4,5; 7,8; 8,6 i 17 μm , słabe pasma absorpcji między 1,3 a 4,2 μm i 9,5-10,7 μm częściowo pokrywające się z pasmami absorpcji H ₂ O, CO ₂ i CH ₄ . Wymagane obserwacje przy bardzo wysokiej rozdzielczości spektralnej na poziomie identyfikacji poszczególnych linii absorpcyjnych.	Ze względu na nakładanie się pasm absorpcyjnych detekcja możliwa tylko w przypadku rejestracji wąskich zakresów spektralnych lub dla planet gdzie H ₂ O jest dominującym składnikiem atmosfery.
	Gazy zawierające siarkę		Charakterystyczne cechy sygnatur znajdują się w podczerwieni w zakresach 6-7 μm , ~10 μm i ~15 μm . Najsilniejsza absorpcja w zakresie środkowej podczerwieni 7 μm , 8-9 i 17 μm . CH ₃ SH ma maksima absorpcji dla 6-7 μm , 8-12 μm i 14-15 μm . Wszystkie te gazy mają właściwości absorpcyjne, które pokrywają się z pasmem O ₃ 9,65 μm . Etan posiada silne maksimum absorpcji w zakresach 6-7 i 11-13 μm oraz słabsze pasmo w 3,3 μm .	Instrumenty JWST w pełni pokrywają maksima absorpcji gazów tego typu, jednak dla zakresu 9,65 μm wymagana jest wysoka rozdzielczość spektralna w celu separacji wpływu ozonu.
	CH ₃ Cl		Maksima absorpcyjne w 3,3; 7,0; 9,7 i 13,7 μm .	Ze względu na pokrywanie się pasm absorpcyjnych najlepsze jest pasmo absorpcyjne w zakresie 13,7 μm .

Powierzchniowa	Pasma absorpcji fotosyntezy dla dużych kompleksów leśnych.	Wymagana separacja dla obserwacji ciągłych (patrz COWAN i STRAIT 2013) minimum 3".	Wymagania przedstawia Tabela 1.	Dla separacji z zakresu 3"-10" możliwe użycie instrumentu NIRSpec w celu pozyskania krzywych spektralnych o niskiej rozdzielczości z użyciem pryzmatu ($R \sim 1.000$), dla separacji >10" możliwość uzyskania krzywych o wysokiej rozdzielczości z użyciem siatki szczelinowej ($R \sim 3.000$)
	Wzorzec typu "red edge"	j.w.	Dla wzorca związanego z pasmami absorpcyjnymi chlorofilu i odbiciem struktury komórkowej wymagana jest rejestracja w kanałach optycznych poniżej i powyżej $0,70 \mu\text{m}$. W zastosowaniach na Ziemi stosowane są zarówno szerokie jak i wąskie kanały optyczne z obszarów światła czerwonego i NIR.	Detekcja wzorca możliwa dla separacji planet co najmniej 3" (z zastosowaniem szerokich kanałów spektralnych), dla separacji co najmniej 10" możliwość użycia wąskich i szerokich kanałów optycznych.
Temporalna	Oscylacje biosygnatur gazowych	Jak dla biosygnatur gazowych. Dodatkowo wymagana rejestracja krzywych blasku dla różnych momentów czasowych w cyklu wegetacyjnym.		
	Oscylacje biosygnatur powierzchniowych	Jak dla biosygnatur powierzchniowych.		

ta jest widoczna w skali globalnej, powinna być możliwa do zaobserwowania również w kontekście egzoplanet.

PODSUMOWANIE

Opisane w tej pracy biosygnatury są potencjalnie możliwe do obserwacji w pasmach UV, widzialnym i NIR. Planowany James Webb Space Telescope zawierać będzie następujące instrumenty służące obserwacji egzoplanet:

1. The Optical Telescope Element (OTE): 6,5 metrowe zwierciadło złożone z 18 segmentów z berylu pokrytego złotem (Ryc. 5);
2. Near Infrared Camera (NIRCam): główne urządzenie do obrazowania w bliskiej podczerwieni i częściowo w paśmie widzialnym ($0,6\text{--}5,0 \mu\text{m}$);
3. Near InfraRed Spectrograph (NIRSpec): spektrograf umożliwiający pozyskanie sygnału w zakresie $0,6\text{--}5,0 \mu\text{m}$;
4. Mid-Infrared Instrument (MIRI): instrument pozwalający pozyskać zarówno zdjęcia, jak i sygnaty w zakresie $5,0\text{--}28,0 \mu\text{m}$;

5. Fine Guidance Sensor pozwalający na precyzyjne prowadzenie instrumentów w kierunku zadanego obiektu astronomicznego.

Wybrany zakres spektralny teleskopu JWST może być użyty do obrazowania wielu biosygnatur opartych o pasmo czerwone oraz bliską i średnią podczerwień. Jest on również odpowiedni do detekcji parametrów egzoplanet opisujących cały kontekst środowiskowy. Zestawienie wymagań instrumentów umożliwiających detekcję poszczególnych biosygnatur przedstawia Tabela 2.

Głównymi zagrożeniami w sukcesie tej misji i potwierdzeniu bądź zaprzeczeniu istnienia biosfer na najbliższych egzoplanetach są wszystkie zagadnienia związane z interpretacją uzyskanych widm i zdjęć. JWST daje szansę na detekcję biosygnatur powierzchniowych dla egzoplanet, dla których rozdzielczość przestrzenna wynosić będzie co najmniej 3". Analogiczny warunek musi być spełniony dla detekcji oscylacji biosygnatur powierzchniowych. Wybrany zakres spektralny instrumentów daje możliwość detekcji większości biosygnatur gazowych. W wypadku pokrywania się zakresów pasm absorp-

cji może jednak być wymagana wysoka rozdzielczość spektralna pozyskiwanych danych.

Szansa, jaką daje technologia zastosowana w JWST, wprowadzi astrobiologów w zupełnie nowe zagadnienia. Pozyskane dane być może po raz pierwszy będą mogły być interpretowane jako biosygnatyry istniejące poza Ziemią. Trzeba pamiętać o wielu potencjalnych błędnych założeniach i interpretacjach, np. z dziedziny nauk geologicznych, których przyczyną było m.in. przekładanie wprost wnioskowania opartego o warunki ziemskie na inne planety.

To, co widzimy na zdjęciach z Marsa, możemy tylko przyrównać do znanych nam form geologicznych. Jednak nie wszystkie marsjańskie formy są jednoznacznie kojarzone z tym, co znamy, niekiedy stanowią one swojego rodzaju zagadkę geologiczną trudną do jednoznacznej identyfikacji i interpretacji. Teledetekcja biomasy w skali planetarnej opiera się co prawda w głównej mierze na teledetekcji związanej z obszarami leśnymi ($\sim 1/3$ powierzchni lądów), jednak prawdopodobnie podczas analiz danych wielospektralnych egzoplanet napotkamy zjawiska zupełnie odbiegające od tego, co już znamy.

Wysłany na Czerwoną Planetę w 2003 r. łazik Opportunity, jeden z bliźniaczych łazików misji NASA Mars Exploration Rover, odkrył na powierzchni charakterystyczne, centymetrowe kulki o przyjętej nazwie blueberries (CHAN i współaut. 2007). Naukowcy zaczęli spekulować, jakiego pochodzenia są te zagadkowe formy geologiczne. Z analizy dostarczonych danych spektrometrycznych wynika, że w ich składzie znajduje się m. in. hematyt, ale konkretnej konkluzji do dzisiaj nie ustalono. Z kolei sonda Mars Reconnaissance Orbiter dostarcza z teleskopu zwierciadlanego HiRISE wysokorozdzielcze zdjęcia powierzchni Marsa. Wiele zagadkowych form obserwowanych na tych zdjęciach do dzisiaj nie zostało wytłumaczonych. Szeregi różnych wgłębień i sferycznych struktur do niedawna interpretowane były jako kratery uderzeniowe, choć kraterami w rzeczywistości nie muszą być. Modele sugerują, że mogły one powstać chociażby przy udziale rozgrzanej magmy. Innym przykładem nierozwikłanej zagadki planetarnej są ciemne smugi, których pochodzenie nie jest do końca wyjaśnione. Wiadomo jedynie, że zjawisko to jest związane z procesami kriogenicznymi, kiedy w czasie wiosny marsjańskiej rozmarzają powierzchniowe warstwy lodu i CO_2 , przykryte pyłem (THOMAS i współaut. 2011). Tworzą się tzw. erupcje freatyczne, które wyrzucają na powierzchnię ciemniejszy materiał, prawdopodobnie piasek bazaltowy. Całość zjawiska formuje ciekawe wzory na powierzchni w postaci smug, rzęs, pióropuszy czy też plam.

Ryc. 5. Główne zwierciadło JWST (The Optical Telescope Element) złożone z 18 heksagonalnych segmentów (źródło: jwst.nasa.gov).

Problemy w interpretacji form marsjańskich biorą się m.in. stąd, że Mars nie posiada roślinności. Erozja, która występuje na Ziemi, związana z opadami i biosferą, nie występuje na Marsie. Zagadkowe formy są trudne do interpretacji z uwagi na swój często odmienny wygląd spowodowany zmianą w czasie, ale w zupełnie inny sposób niż na Ziemi. Często te formy są pozostałością z początków powstawania planety, czyli sprzed 4 miliardów lat i trwają w formie niezmienionej, podczas gdy na Ziemi już dawno uległy by destrukcji.

Należy mieć na uwadze, że tak znaczne problemy w interpretacji dotyczą planety, którą możemy badać metodami teledetekcyjnymi z dokładnością do 25 cm. Do pozyskanych przez JWST danych trzeba zatem będzie podchodzić z dużą rezerwą.

Numeryczne symulacje danych obserwacyjnych przeprowadzone przez grupę T. Greene w NASA Ames Research Center wskazują, że JWST prawdopodobnie uzyska wysokiej jakości widma transmisyjne i emisyjne atmosfer egzoplanet w zakresie długości fal co najmniej 1–11 μm . Uzyskanie tego typu danych wymagać będzie co najmniej 4 obserwacji zaćmień lub tranzytów (przy założeniu, że stosunek sygnału do szumu będzie podobny jak na Hubble Space Telescope i teleskopie Spitzera). Stosunek ten może być jednak niewystarczający do obserwacji takich parametrów spektralnych, jak stosunek węgla do tlenu. Dodatkowo, zakres widm transmisyjnych 1–2,5 μm w symulacjach był często nieużyteczny w poprawnej detekcji biosygnatyry, dlatego w celu określenia poprawnego składu atmosfer pochmurnych lub o wysokiej średniej masie cząsteczkowej często wymagana będzie analiza pełnego zakresu 1–11 μm (GREENE i współaut. 2016).

Rozwiązywanie zagadnień mapowania zadanych przez modelowe sygnatury spektralne typów powierzchni (szczególnie dotyczących podczerwieni, rejestrowane przez instrumenty NIRCam, NIRSpec i MIRI) algorytmami PCA, Rotational Unmixing (np. COWAN i STRAIT 2013), a także analizę krzywych blasku zaćmienia wtórnego (np. WILLIAMS i współaut. 2006) nie wymaga wysokiej rozdzielczości spektralnej w całym zakresie, a jedynie rejestrowania przez JWST krzywych w częstotliwościach, którymi się różnią zakładane w modelach typy powierzchni.

W celu poprawnej interpretacji otrzymanych danych niezbędna będzie zatem wiedza środowiska naukowego, na co dzień zajmującego się teledetekcją na Ziemi, a także znającego od praktycznej strony procesy zachodzące w tego typu biosferach. Umieszczenie wiosną 2019 r. wokół punktu libracyjnego L_2 teleskopu JWST będzie dobrą okazją do zacieśnienia współpracy środowisk zaangażowanych w analizę danych astrofizycznych i procesów zachodzących w biocenozie leśnej.

PODZIĘKOWANIA

Autorzy dziękują p. Robertowi Lossing z Earth Sciences Division (Goddard Space Flight Center, NASA) za cenne konsultacje i wkład merytoryczny w zakresie detekcji biomasy na powierzchniach skalistych oraz w oceanie, panu Wojciechowi Małeckiemu za konsultacje w zakresie reakcji redukcji, kierownikowi i całemu zespołowi Zakładu Teledetekcji za nieustanną inspirację w podejmowaniu nietypowych zagadnień. W publikacji wykorzystano m.in. wyniki, które powstały w ramach projektu HESOFF (LIFE11 ENV/PL/000459).

Streszczenie

Teledetekcja czynników związanych z występowaniem obszarów zalesionych jest dziedziną nauki, która zgromadziła nieocenioną ilość danych dotyczących procesów zachodzących w ekosystemach leśnych w mikro- i makroskali. W naszej publikacji skupiamy się na biosygnaturach lasów, których detekcja na najbliższych Ziemi egzoplanetach teoretycznie mogłaby być prowadzona w oparciu o dane wielospektralne rejestrowane przez mający rozpocząć pracę wiosną 2019 r. Kosmiczny Teleskop Jamesa Webba (JWST ang. *John Webb Space Telescope*). W tym kontekście analizujemy możliwość i metody detekcji biosygnatur gazowych (np. O_2 , CO_2 , metanu), powierzchniowych (np. wzorca „red edge”, pasm absorpcji pigmentów) oraz opartych na zmienności sygnatur spektralnych, które mogą być rezultatem sezonowych procesów w biosferze. Wyniki tego przeglądu odnosimy do historycznych badań najbardziej znanego środowiska planetarnego poza Ziemią, Marsa. Postulujemy wykorzystanie w przyszłych badaniach nad egzoplanetami wyników prac teledetekcyjnych oraz modelujących zjawiska zachodzące w ekosystemach leśnych na Ziemi. Zwracamy jednak uwagę na potrzebę wielkiej ostrożności w interpretacji uzyskanych wyników.

LITERATURA

- BERDYUGINA S. V., KUHN J. R., 2017. *Surface imaging of proxima b and other exoplanets: topography, biosignatures, and artificial mega-structures*. preprint arXiv, 1711.00185.
- CIAIS P., TANS P. P., TROLIER M., WHITE J. W. C., FRANCEY R. J., 1995. *A large northern hemisphere terrestrial CO₂ sink indicated by the ¹³C/¹²C ratio of atmospheric CO₂*. Science 269, 1098-1102.
- CHAKRABARTI S., MENDILLO C. B., COOK T. A. i współaut., 2016. *Planet Imaging Coronagraphic Technology using a Reconfigurable Experimental Base (PICTURE-B): The second in the series of suborbital exoplanet experiments*. J. Astronom. Instrument. 5, 1640004.
- CHAN M. A., ORMO J., PARK A. J., 2007. *Models of iron oxide concretion formation: field, numerical, and laboratory comparisons*. Geofluids 7, 1-13.
- CLAUDI R., 2017. *Exoplanets: possible biosignatures*. preprint arXiv:1708.05829.
- COWAN N. B., STRAIT T. E., 2013. *Determining reflectance spectra of surfaces and clouds on exoplanets*. Astrophys. J. Lett. 765, L17.
- CLARK R. N., SWAYZE G. A., WISE R. i współaut., 2007. *USGS digital spectral library splib06a*. US Geol. Survey Publ., <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ds231>.
- CZAPSKI P., KOTLARZ J., KUBIAK K., TKACZYK M., 2014. *Analiza czynnikowa zdjęć wielospektralnych*. Prace Instytutu Lotnictwa 1, 143-150.
- CZAPSKI P., KACPRZAK M., KOTLARZ J., MROWIEC K., KUBIAK K., TKACZYK M., 2015. *Preliminary analysis of the forest health state based on multispectral images acquired by Unmanned Aerial Vehicle*. Folia Forestalia Polo. 57, 138-144.
- DES MARAIS D. J., HARWIT M. O., JUCKS i współaut., 2002. *Remote sensing of planetary properties and biosignatures on extrasolar terrestrial planets*. Astrobiology 2, 153-181.
- DES MARAIS D. J., NUTH III J. A., ALLAMANDOLA L. J., BOSS i współaut., 2008. *The NASA astrobiology roadmap*. Astrobiology 8, 715-730.
- DOUGHTY C. E., METCALFE D. B., GIRARDIN C. A. J., AMÉZQUITA F. F. i współaut., 2015. *Drought impact on forest carbon dynamics and fluxes in Amazonia*. Nature 519, 78-82.
- DRESSLER A., BROWN R. A., DAVIDSEN A. F. i współaut., 1996. *Exploration and the search for origins: a vision for ultraviolet-optical-infrared space astronomy*. Association of Universities for Research in Astronomy.
- FITZPATRICK M. R., PEARSON K., GRIFFITH C. A., i współaut., 2016. *A study of the effects of underlying assumptions in the reduction of multi-object photometry of transiting exoplanets*. Am. Astronom. Soc. Meeting, 227.
- FUJII Y., LUSTIG-YAEGER J., COWAN N. B., 2017. *Rotational spectral unmixing of exoplanets: degeneracies between surface colors and geography*. Astronom. J. 154, 189.
- FUHRMANN D. R. 1999. *Simplex shrink-wrap algorithm*. [W:] *Automatic target recognition IX*. International Society for Optics and Photonics 3718, 501-512.
- GRENFELL J. L., GEBAUER S., GODOLT M., PALCZYNSKI K., RAUER H., STOCK J., VON PARIS P., LEHMANN R., SELSIS F., 2013. *Potential biosignatures in super-Earth atmospheres II. Photochemical responses*. Astrobiology 13, 415-438.
- GREENE T. P., LINE M. R., MONTERO C., FORTNEY J. J., LUSTIG-YAEGER J., LUTHER K., 2016.

- Characterizing transiting exoplanet atmospheres with JWST. *Astrophys. J.* 817, 17.
- HANSEN K., PERSONNE E., SKJØTH C. A. i współaut., 2017. Investigating sources of measured forest-atmosphere ammonia fluxes using two-layer bi-directional modelling. *Agricul. Forest Meteorol.* 237, 80-94.
- HORLER D. N. H., DOCKRAY M., BARBER J., 1983. The red edge of plant leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 4(2), 273-288.
- KACPRZAK M., KOTLARZ J., KUBIAK K., ROTCHIMMEL K., TKACZYK M., 2018. Metodyka oszacowania defoliacji *Quercus Robur L.* na podstawie analizy refleksyjności w zakresie 0,64-0,73 μm . *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna* 1, 15-19.
- KASTING J. F., WHITMIRE D. P., REYNOLDS R. T., 1993. Habitable zones around main sequence stars. *Icarus* 101, 108-128.
- KASTING J. F., KOPPARAPU R., RAMIREZ R. M., HARMAN C. E., 2014. Remote life-detection criteria, habitable zone boundaries, and the frequency of Earth-like planets around M and late K stars. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 111, 12641-12646.
- KOLUSU S. R., SCHLÜNZEN K. H., GRAWE D., SEIFERT R., 2018. Determination of chloromethane and dichloromethane in a tropical terrestrial mangrove forest in Brazil by measurements and modelling. *Atmosph. Environ.* 173, 185-197.
- KOPPARAPU R. K., RAMIREZ R., KASTING J. F. i współaut., 2013. Habitable zones around main-sequence stars: new estimates. *Astrophys. J.* 765, 131.
- KOTLARZ J., KACPRZAK M., 2017. Algorytm automatycznego oszacowania zróżnicowania gatunkowego drzewostanu z wykorzystaniem zdjęć RGB koron drzew. *Pomiary Automatyka Robotyka*, 21.
- KOTLARZ J., KUBIAK K., KACPRZAK M., CZAPSKI P., 2016. Estimation of tree species diversity of forest stands based on their spectral reflectance. *Sylvan* 160, 1036-1045.
- KUBIAK K., MAZUR A., SKOCKI K., 2016. Laboratory spectral analyses. Raport techniczny z prac wykonywanych w projekcie HESOFF.
- LUTSCH E., DAMMERS E., CONWAY S., STRONG K., 2016. Long-range transport of NH_3 , CO, HCN, and C_2H_6 from the 2014 Canadian Wildfires. *Geophys. Res. Lett.* 43, 8286-8297.
- MANNE J., BUI T., CHRISTOPHER R. Q., WEBSTER C. R., 2017. Determination of foreign broadening coefficients for Methane Lines Targeted by the Tunable Laser Spectrometer (TLS) on the Mars Curiosity Rover. *J. Quant. Spectr. Radiat. Transfer* 191, 59-66.
- MARCO E., SALVADOR A., MASSOL H., DAVAILLE A., 2017. Thermal radiation of magma ocean planets using a 1D radiative-convective model of H_2O - CO_2 atmospheres. *J. Geophys. Res. Planets*, doi.org/10.1002/2016JE005224.
- MEADOWS V. S., 2017. Reflections on O_2 as a biosignature in exoplanetary atmospheres. *Astrobiology* 17, 1022-1052.
- MEADOWS V. S., REINHARD C. T., ARNEY G. N. i współaut., 2017. Exoplanet biosignatures: understanding oxygen as a biosignature in the context of its environment. preprint arXiv, 1705.07560.
- NASIŁOWSKA S., KACPRZAK M., KOTLARZ J., RYŃKIEWICZ A., ROTCHIMMEL K., 2016. Teledetekcja w badaniu wpływu suszy na stan zdrowotny drzewostanów dębowych. Konferencja: „Drzewa i lasy w zmieniającym się środowisku”, Instytut Dendrologii PAN.
- OLLIVIER M., MAUREL M. C., 2014. Planetary environments and origins of life-how to reinvent the study of origins of life on the earth and life in the Universe under the light of exoplanetology progress. [W:] *BIO Web of Conferences*. EDP Sciences 2, 00001.
- PANGALA S. R., HORNIBROOK E. R., GOWING D. J., GAUCI V., 2015. The contribution of trees to ecosystem methane emissions in a temperate forested wetland. *Global Change Biol.* 21, 2642-2654.
- PARENTIER V., GUILLOT T., SHOWMAN A. P., FORTNEY J., MARLEY M., 2015. Characterizing exoplanets atmospheres with space photometry at optical wavelengths. [W:] *EPJ Web of Conferences*. EDP Sciences 101, 02002.
- PLUTO-KOSSAKOWSKA J., OSIŃSKA-SKOTAK K., STRENCZAK K., 2017. Określenie rozdzielczości przestrzennej wielospektralnych zdjęć satelitarnych optymalnej do detekcji martwych drzew na obszarach leśnych. *Sylvan* 161, 395-404.
- RAHN T., EILER J. M., KITCHEN N., FESSENDEN J. E., RANDERSON J. T., 2002. Concentration and δD of molecular hydrogen in boreal forests: Ecosystem-scale systematics of atmospheric H_2 . *Geophys. Res. Lett.*, doi.org/10.1029/2002GL015118.
- ROBINSON T. D., 2017. Characterizing exoplanets for habitability. preprint arXiv, 1701.05205.
- ROBINSON T. D., ENNICO K., MEADOWS V. S. i współaut., 2014. Detection of ocean glint and ozone absorption using LCROSS Earth observations. *Astrophys. J.* 787, 171.
- SCHWIETERMAN E. W., COCKELL C. S., MEADOWS V. S., 2015. Nonphotosynthetic pigments as potential biosignatures. *Astrobiology* 15, 341-361.
- SCHWIETERMAN E. W., KIANG N. Y., PARENTEAU i współaut., 2017. Exoplanet biosignatures: a review of remotely detectable signs of life. preprint arXiv, 1705.05791.
- SEAGER S., TURNER E. L., SCHAFER J., FORD E. B., 2005. Vegetation's red edge: a possible spectroscopic biosignature of extraterrestrial plants. *Astrobiology* 5, 372-390.
- STEIGENBERGER S., TERJUNG F., GROSSART H. P., REUTER R., 2004. Blue-fluorescence of NADPH as an indicator of marine primary production. *EARSeL eProceedings* 3, 18-25.
- TINETTI G., RASHBY S., YUNG Y. L., 2006. Detectability of red-edge-shifted vegetation on terrestrial planets orbiting M stars. *Astrophys. J. Lett.* 644, L129.
- THOMAS N., PORTYANKINA G., HANSEN C. J., POMMEROL A., 2011. HiRISE observations of gas sublimation-driven activity in Mars' southern polar regions: IV. Fluid dynamics models of CO_2 jets. *Icarus* 212, 66-85.
- TUCKER C. J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.* 8, 127-150.
- TURNBULL M. C., TRAUB W. A., JUCKS K. W. i współaut., 2006. Spectrum of a habitable world: Earthshine in the near-infrared. *Astrophys. J.* 644, 551.
- UDALSKI A., JAROSZYŃSKI M., PACZYŃSKI B. i współaut., 2005. A jovian-mass planet in microlensing event OGLE-2005-BLG-071. *Astrophys. J. Lett.* 628, L109.
- WEI J., AMELUNG W., LEHNDORFF E., SCHLOTER M., VEREECKEN H., BRÜGGEMANN N., 2017. N_2O and NO_x emissions by reactions of nitrite with soil organic matter of a Norway spruce forest. *Biogeochemistry* 132, 325-342.

- WEI S., ZHONG-QUAN Q., 2017. *Polarimetric study of an Earth-like Planet*. Chin. Astr. Astrophys. 41, 235-253.
- WILLIAMS P. K., CHARBONNEAU D., COOPER C. S., SHOWMAN A. P., FORTNEY J. J., 2006. *Resolving the surfaces of extrasolar planets with secondary eclipse light curves*. Astrophys. J. 649, 1020.
- WITEK P., CZECHOWSKI L., 2016. *Morphology of river deltas on Earth and Titan*. [W:] EGU General Assembly. Conference abstracts. Geophys. Res. Abstracts 18, 14415.
- WOLSTENCROFT R. D., RAVEN J. A., 2002. *Photosynthesis: likelihood of occurrence and possibility of detection on Earth-like planets*. Icarus 157, 535-548.
- ZALEWSKA N., 2013. *Hellas Planitia as a potential site of sedimentary minerals*. Planet Space Sci. 78, 25-32.
- ZALEWSKA N., KOTLARZ J., KACPRZAK M., KORNIŁUK T., 2017. *Detekcja biomarkerów w pióropuszcach gazowych za pomocą kamery wielospektralnej w projektowanej misji Enceladus Orbiter (NASA)*. Pomiary Automatyka Robotyka 21, 35-44.

KOSMOS Vol. 67, 4, 709–720, 2018

JAN KOTLARZ ¹, NATALIA ZALEWSKA^{1,2}

¹Remote Sensing Division, Institute of Aviation, 110/114 Al. Krakowska Str., 02-256 Warszawa, ²²Space Research Center PAS, 18A Bartycka Str., 00-716 Warszawa, E-mail: jan.kotlarz@ilot.edu.pl, natalia.zalewska@ilot.edu.pl

SPECTRAL CHARACTERISTICS IN THE VISIBLE AND INFRARED REGIONS OF EXOPLANETS WITH FOREST-TYPE SURFACE. STATE OF KNOWLEDGE BEFORE JWST MISSION

Summary

Remote sensing of forest areas is a field of science that has gained an invaluable amount of data describing processes in forest ecosystems in micro- and macro-scale. In this paper, we focus on biosignatures of forests, whose detection on the nearest Earth exoplanets theoretically could be conducted on the basis of multispectral data recorded by the James Webb Space Telescope (JWST), whose mission will start in the spring 2019. In this context, we analyze possibilities and methods of detection of the following types of biosignatures: gas (e.g. O₂, CO₂, methane), surface (e.g. "red edge" pattern, pigment absorption bands) and spectral signatures based on variations that may result from seasonal processes in the biosphere. The results presented in this review are referred to the past studies on Mars, with the best known planetary environment besides the Earth. We postulate the usage of the forest areas remote sensing projects and modeling phenomena occurring in forest ecosystems on Earth in future exoplanet research. However, we draw attention to the need for great caution in interpreting the obtained results.

Keywords: biosignatures, exoplanets, JWST, photosynthesis, red edge, remote sensing