

Artykuł naukowy

Zdalne wykrywanie właściwości planetarnych i biosygnatur na pozasłonecznych planetach ziemskich

DAVID J. DES MARAIS,¹ MARTIN O. HARWIT,² KENNETH W. JUCKS,³ JAMES F. KASTING,⁴ DOUGLAS N.C. LIN,⁵ JONATHAN I. LUNINE,⁶ JEAN SCHNEIDER,⁷ SARA SEAGER,⁸ WESLEY A. TRAUB,³
oraz NEVILLE J. WOOLF⁶

STRESZCZENIE

Głównym celem misji Terrestrial Planet Finder (TPF) NASA oraz misji Darwin Europejskiej Agencji Kosmicznej jest bezpośrednie wykrywanie planet pozasłonecznych wielkości Ziemi oraz poszukiwanie spektroskopowych dowodów na istnienie warunków sprzyjających życiu. W niniejszym artykule przedstawiamy zalecane zakresy długości fal oraz cechy spektralne dla tych misji. Oceniamy znane spektroskopowe cechy pasm molekularnych Ziemi, Wenus i Marsa w kontekście domniemanych analogów pozasłonecznych. Preferowane zakresy długości fal to 7–25 mm w średniej podczerwieni i 0,5 do 1,1 mm w zakresie od światła widzialnego do bliskiej podczerwieni. Wykrywanie O₂ lub jego fotolitycznego produktu O₃ ma najwyższy priorytet. Ciekły H₂O nie jest bioindykatorem, ale uważa się go za niezbędny do życia. Znaczna ilość CO₂ wskazuje na atmosferę i stan utlenienia typowy dla planet ziemskich. Obfitość CH₄ może wymagać źródła biologicznego, ale obfitość CH₄ może również wynikać z obecności skorupy i górnej części płaszcza bardziej zredukowanych niż na Ziemi. Zakres cech planet skalistych poza Układem Słonecznym może znacznie przekraczać zakres cech planet Układu Słonecznego. Wielkość i masa planety są bardzo ważnymi wskaźnikami jej zdolności do podtrzymywania życia i można je oszacować w zakresie średniej podczerwieni, a potencjalnie także w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni. Dodatkowe cechy spektroskopowe zasługują na zbadanie, na przykład cechy tworzone przez inne związki biosygnatur w atmosferze lub na powierzchni oraz cechy wynikające z rozpraszania Rayleigha. Podsumowując, stwierdzamy, że zarówno zakres średniej podczerwieni, jak i zakres od widzialnego do bliskiej podczerwieni dostarczają cennych informacji dotyczących biosygnatur i właściwości planet, dlatego też oba zasługują na poważne rozważenie naukowe w przypadku TPF i Darwin. Słowa kluczowe: Spektroskopia — Biosygnatury — Planety pozasłoneczne — Terrestrial Planet Finder — Darwin — Planety nadające się do zamieszkania. *Astrobiologia* 2, 153–181.

¹ Centrum Badawcze Ames, Moffett Field, Kalifornia.

² Uniwersytet Cornell, Ithaca, NY.

³ Centrum Astrofizyki Harvard-Smithsonian, Cambridge, MA.

⁴ Uniwersytet Stanowy Pensylwanii, State College, PA.

⁵ Uniwersytet Kalifornijski, Santa Cruz, Kalifornia.

⁶ Uniwersytet Arizony, Tucson, AZ. ⁷ Obserwatorium

Paryskie, Meudon, Francja. ⁸ Instytut Studiów

Zaawansowanych, Princeton, NJ.

DLACZEGO WARTO PROWADZIĆ SPEKTROSKOPOWE POSZUKIWANIA ŻYCIA W KOSMOSIE?

O Nasze poszukiwania życia gdzie indziej nieuchronnie pogłębią nasze zrozumienie samego życia. Obecnie Większość definicji życia wymienia zazwyczaj jego kluczowe cechy (np. Morowitz, 1992). Jako przykład podaje się zdolność komórek i ekosystemów do pozyskiwania energii, metabolizowania, replikacji i ewolucji. Nasze definicje opierają się na życiu na Ziemi, ale będą miały wpływ na naszą strategię poszukiwania życia gdzie indziej. W związku z tym musimy rozróżnić cechy życia, które są naprawdę uniwersalne, od tych, które odzwierciedlają wyłącznie szczególną historię naszej własnej biosfery. W niniejszym opracowaniu zakładamy, że wszelkie formy życia wymagają złożonych związków organicznych, które oddziałują na siebie w ciekłym rozpuszczalniku wodnym. Założenia te nie wydają się nadmiernie restrykcyjne, biorąc pod uwagę, że życie jest bogatą w informacje jednostką, która zasadniczo zależy od silnej polaryzacji związanego z nią rozpuszczalnika. Związki i struktury węglowe wydają się nie mieć sobie równych pod względem potencjału osiągnięcia wysokiej zawartości informacji. Inne prawdopodobne rozpuszczalniki nie mogą dorównać silnej dychotomii polarnej i niepolarnej, jaką woda utrzymuje z niektórymi substancjami organicznymi, a dychotomia ta jest niezbędna do utrzymania stabilnych struktur biomolekularnych i komórkowych. Jednak nasza biosfera wykorzystuje tylko niewielką część potencjalnie użytecznych związków organicznych. Obecne formy życia prawdopodobnie badały alternatywne możliwości, więc ich odkrycie zwiększy znaną różnorodność życia.

Istnieje szerokie spektrum opinii dotyczących bytów namiot, do którego zmierzały procesy determinujące pochodzenie i ewolucję życia na Ziemi (procesy deterministyczne) lub były one bardziej przypadkowe (napędzane przez kontyngencję) (Des Marais i Walter, 1999). Jedną z opinii głosi, że przypadek może odgrywać pewną rolę, ale tylko w granicach wyznaczonych przez fizyczne i chemiczne właściwości życia (DeDuke, 1995). Chociaż ewolucja na innej planecie mogła podążać alternatywnymi ścieżkami, „... niektóre kierunki mogą nieść ze sobą tak decydujące korzyści selekcyjne, że istnieje duże prawdopodobieństwo, iż wystąpią one również gdzie indziej...” (DeDuke, 1995). Alternatywny pogląd głosi, że proces ewolucji może odzwierciedlać głównie wynik nieskończonej liczby „przypadkowych” zdarzeń (Gould, 1996). Gdybyśmy więc byli w stanie „przeznaczyć taśmę życia i odtworzyć ją ponownie”, za każdym razem uzyskalibyśmy zasadniczo inny wynik. Jedną z głównych przeszkód w rozstrzygnięciu tych rozbieżnych poglądów jest to, że znamy historię tylko jednej biosfery.

Gdybyśmy mieli inne przykłady, moglibyśmy je bezpośrednio porównać i zacząć dostrzegać ogólne zasady dotyczące pochodzenia i ewolucji życia. Ta okoliczność stanowi silny argument naukowy przemawiający za poszukiwaniem życia gdzie indziej.

Jak możemy szukać zamieszkałych planet pozasłonecznych? Wykrywanie życia *na miejscu* to strategia, która może się sprawdzić w Układzie Słonecznym, ale nie na planetach pozasłonecznych. Jednak wydaje się, że możliwe jest wykrywanie śladów biologicznych, czyli „biosygnatur”, za pomocą teledetekcji. Istnieją co najmniej dwa rodzaje biosygnatur: cechy spektralne i/lub polaryzacyjne tworzone przez produkty biologiczne oraz sygnały elektromagnetyczne tworzone przez technologię. Ten drugi przykład biosygnatury wymaga poszukiwań podobnych do SETI. Jednak niniejsza dyskusja dotyczy sygnatur spektralnych produktów biologicznych, a także właściwości planet nadających się do zamieszkania. Są to rzeczywiście obiecujące cele dla badań w najbliższej przyszłości (np. Owen, 1980). Biomarkery spektralne mogą powstawać z składników organicznych (np. roślinności) i/lub produktów nieorganicznych (np. atmosferycznego O₂). Cechy spektralne pochodzące z powierzchni planety są prawdopodobnie zlokalizowane w określonych regionach, podczas gdy gazowe biomarkery mogą być rozprzestrzeniane globalnie przez cyrkulację atmosferyczną.

PODSTAWOWE CELE NAUKOWE W POSZUKIWANIU SYGNATUR SPEKTRALNYCH ŻYCIA POZAUKWIATOWEGO ORAZ DUŻA RÓŻNORODNOŚĆ PLANET ZIEMSKICH

W obrębie naszego Układu Słonecznego poszukiwania życia pozaziemskiego i dowodów na pochodzenie życia na Ziemi będą prawdopodobnie ograniczone do Marsa, Europy i Tytana. Małe ciała niebieskie, takie jak komety, asteroidy i meteoryty, dostarczają informacji na temat chemicznych „budulców” życia. Obiekty te stanowią doskonałą okazję do przeprowadzenia szczegółowych badań, które nie są możliwe w przypadku eksploracji poza Układem Słonecznym. Jednak zaletą badań poza Układem Słonecznym jest większa różnorodność środowisk planetarnych i etapów ich rozwoju, które można badać. Poszukiwanie planet pozasłonecznych z biosferami, które będziemy tutaj nazywać planetami nadającymi się do zamieszkania, jest poszukiwaniem najszerzej możliwej różnorodności biologicznej — poszukiwaniem planet, na których istnieje życie, którego pochodzenie jest prawie na pewno niezależne od naszego, biorąc pod uwagę ogromne odległości i surowe promieniowanie przestrzeni międzygwiazdnej.

Przy określaniu odpowiedniego zakresu długości fal, w którym można wykryć spektroskopowo cechy świata nadającego się do zamieszkania, należy pamiętać, że zakres cech planet skalistych prawdopodobnie wykracza poza nasze doświadczenia związane z czterema planetami ziemskimi i Księżycem. Chociaż Księżyc i Merkury, które są prawie (ale nie całkowicie) pozbawione atmosfery, stanowią prawdopodobnie skrajny przypadek planet ziemskich pozbawionych życia, zawsze mogą pojawić się niespodzianki. Na przykład, na podstawie danych radarowych wydaje się, że Merkury posiada małe czapy polarne z lodu wodnego, a źródłem wody wydaje się być egzogeniczne uderzenie materiału lodowego, po którym nastąpiła migracja cząsteczek w kierunku biegunów. Gdyby takie ciało znajdowało się w układzie planetarnym, w którym płaszczyzna orbity jest skierowana w stronę Ziemi, czy ślady lodu wodnego byłyby wykrywalne w zakresie bliskiej podczerwieni, a jeśli tak, to jakie wnioski można by wyciągnąć na temat zdolności takiego obiektu do podtrzymywania życia? Możliwość zamieszkania można by wykluczyć, gdyby półosiowa wielka była zbyt mała (w rzeczywistości planeta mogłaby zostać całkowicie pominięta), ale żadne prawa fizyki nie wykluczają istnienia „Merkurego” umieszczonego na orbicie, powiedzmy, Wenus (0,7 AU). Jakie wnioski można by wtedy wyciągnąć?

Podobnie, nieobecny Jowisz w naszym układzie planetarnym...

tem, raczej bogata w wodę planeta lądowa, prawdopodobnie o masie porównywalnej do masy Ziemi, mogła powstać w miejscu Marsa lub poza Marsem, w obszarze orbitalnym naszego obecnego pasa asteroid. Nie mamy absolutnie żadnego doświadczenia z takim ciałem niebieskim, a modele stabilności gęstej atmosfery cieplarnianej i ewolucji powierzchniowo-atmosferycznej są naszymi jedynymi wskazówkami w takim przypadku. Jakich oznak szukalibyśmy w przypadku takiego obiektu?

Jak ustalilibyśmy, czy oznaki zdolności do podtrzymywania życia sugerują stabilne warunki w skali geologicznej, a nie tylko w ograniczonych okresach w odległej lub nawet niedawnej przeszłości, poza oparciem się na przypuszczeniach? W niektórych układach planety mogą nie leżeć w tej samej płaszczyźnie, a zatem orbity planet ziemskich mogą powoli migrować do i z strefy zamieszkalnej w długich okresach czasu. Podobnie planety podobne do Ziemi, orbitujące wokół gwiazd o bardzo różnym typie spektralnym niż Słońce, a zatem o różnym rozkładzie energii spektralnej, mogą ewoluować w różny sposób. Inne planety będą różnić się od Ziemi pod względem względnych ilości promieniowania UV w stosunku do promieniowania widzialnego, które otrzymują od swojej gwiazdy macierzystej, zmienności jasności gwiazdy macierzystej w czasie oraz charakterystyki wiatru gwiazdowego i magnetosfery gwiazdy. Różnice te przekładają się na różnorodność wzorców ewolucji atmosfery i zdolności planet do podtrzymywania życia, które niestety trudno jest oszacować.

Nieszczęsny bohater sztuki Szekspira *Hamlet* upominał swojego przyjaciela: „W niebie i na ziemi jest więcej rzeczy, Horacio, niż się śniło twojej filozofii”. Dzisiaj moglibyśmy zamiast tego ostrzec samych siebie przed pewnością, że w niebie jest więcej rodzajów Ziemi, niż się śniło naszej filozofii. Każda misja mająca na celu wykrycie i scharakteryzowanie spektroskopowo planet ziemskich wokół innych gwiazd musi być zaprojektowana tak, aby mogła scharakteryzować różne typy planet ziemskich z użytecznym wynikiem. Misje takie są obecnie przedmiotem badań – Terrestrial Planet Finder (TPF) prowadzony przez NASA oraz Darwin prowadzony przez Europejską Agencję Kosmiczną. Ponieważ projekty tych dwóch misji są dalekie od sfinalizowania, nie rozróżniamy ich potencjalnych możliwości, ale dla wygody odnosimy się po prostu do koncepcji dużej kosmicznej misji spektroskopowej mającej na celu scharakteryzowanie planet ziemskich i wykrycie życia jako TPF/Darwin w dalszej części tekstu.

Głównym celem TPF/Darwin jest dostarczanie danych biologom i chemikom atmosferycznym. Badacze ci będą oceniać obserwacje potencjalnie szerokiej gamy obiektów pod kątem dowodów na obecność życia i warunków środowiskowych, w których takie życie mogłoby istnieć (np. Beichman *et al.*, 1999; Caroff i Des Marais, 2000). Koncepcja TPF/Darwin opiera się na założeniu, że można spektroskopowo badać planety pozasłoneczne pod kątem ich zdolności do podtrzymywania życia. Aby takie założenie było słuszne, musimy odpowiedzieć na następujące pytania: Co sprawia, że planeta nadaje się do życia i jak można to zbadać zдалnie? Jakie różnorodne skutki może wywierać biota na widma atmosfer planetarnych? Jakich fałszywych wyników pozytywnych możemy się spodziewać? Jaka może być historia ewolucji atmosfer? A przede wszystkim, jakie są solidne wskaźniki życia? Strategia poszukiwań powinna obejmować następujące cele, które łącznie stanowią kamienie milowe rozwoju TPF/Darwin.

TPF/Darwin musi badać pobliskie gwiazdy dla układy planetarne, które zawierają planety wielkości Ziemi w swoich strefach zamieszkalnych [planety „podobne do Ziemi” (Beichman *et al.*, 1999)]. Za pomocą spektroskopii TPF/Darwin musi ustalić, czy planety te mają atmosferę i czy nadają się do zamieszkania. Definiujemy planetę nadającą się do zamieszkania w „klasycznym” znaczeniu, czyli planetę posiadającą atmosferę i wodę w stanie ciekłym na swojej powierzchni. Strefa zamieszkalna to zatem strefa, w której światło pochodzące od macierzystej gwiazdy planety (jej „Słońca”) jest wystarczająco intensywne, aby utrzymać

ciepła woda na powierzchni, bez wywoływania niekontrolowanych warunków cieplarnianych, które powodują rozpad wody i utratę wodoru w przestrzeń kosmiczną (Kasting *et al.*, 1993). Wielkość planety może decydować o jej zdolności do utrzymania warunków sprzyjających życiu (np. Kasting *et al.*, 1993). Większe planety charakteryzują się wyższym poziomem aktywności tektonicznej, która utrzymuje się również przez dłuższy czas. Aktywność tektoniczna podtrzymuje wulkanizm, a także ogrzewa skały skorupy ziemskiej i powoduje recykling CO₂ i innych gazów z powrotem do atmosfery. Procesy te są niezbędne do zapewnienia stabilności klimatu w skali czasowej geologicznej (Kasting *et al.*, 1984).

Istnieją interesujące potencjalne przykłady, gdzie woda w stanie ciekłym może występować wyłącznie głęboko pod powierzchnią, np. na księżycu Jowisza, Europie (np. Reynolds *et al.*, 1987) lub na dzisiejszej Marsie. Jednak biosfery, w których woda w stanie ciekłym występuje wyłącznie pod powierzchnią, mogą być niewykrywalne przez TPF/Darwin. Zatem planeta posiadająca wodę w stanie ciekłym na swojej powierzchni spełnia naszą operacyjną definicję zdolności do podtrzymywania życia, zgodnie z którą warunki sprzyjające życiu muszą być wykrywalne. Badania układów planetarnych ujawnią również, w jaki sposób obfitość substancji lotnych umożliwiających życie, takich jak woda na planecie podobnej do Ziemi, jest powiązana z charakterystyką całego układu planetarnego (Lunine, 2001).

Dane TPF/Darwin pozwolą na wybranie najbardziej obiecujących planet do bardziej szczegółowej spektroskopii w celu wykrycia biosygnatur. Biosygnatura to cecha, której obecność lub obfitość wymaga biologicznego pochodzenia. Biosygnatury powstają podczas pozyskiwania energii lub składników chemicznych niezbędnych do biosyntezy lub obu tych procesów (np. prowadząc do gromadzenia się tlenu atmosferycznego lub metanu). Biomarkery mogą być również produktami biosyntezy cząsteczek i struktur bogatych w informacje (np. złożonych cząsteczek organicznych i komórek). O istnieniu życia mogą świadczyć zaburzenia równowagi chemicznej, których nie można wyjaśnić wyłącznie procesami niebiologicznymi. Na przykład planeta aktywna geologicznie, która wydziela zredukowane gazy wulkaniczne, może utrzymać wykrywalny poziom tlenu atmosferycznego tylko w obecności organizmów fotosyntetycznych wytwarzających tlen. Alternatywnie, zamieszkała planeta o umiarkowanie zredukowanych wnętrzach może zawierać większe stężenia metanu atmosferycznego niż planeta niezamieszkała, ze względu na biosyntezę metanu z dwutlenku węgla i wodoru w niższych temperaturach (poniżej 120°C) (Komitet ds. Pochodzenia i Ewolucji Życia, 2002).

Chociaż strategia poszukiwań TPF/Darwin powinna skupiać się na planetach „podobnych do Ziemi”, TPF/Darwin powinien również dokumentować właściwości fizyczne i skład szerszej gamy planet. Zdolność ta jest niezbędna do prawidłowej interpretacji potencjalnych związków biosygnatur. Na przykład obecność tlenu cząsteczkowego w atmosferach Wenus i Marsa można rzeczywiście przypisać procesom niebiologicznym, ale tylko poprzez właściwą ocenę warunków i procesów, które mają na to wpływ (np. Kasting i Brown, 1998). Z drugiej strony planeta może znacznie różnić się od Ziemi, a mimo to być nadająca się do zamieszkania. W związku z tym, aby dokładnie ocenić kosmiczny rozkład planet nadających się do zamieszkania, musimy zrozumieć zarówno procesy powstawania układów planetarnych, jak i czynniki kontrolujące trwałość stref nadających się do zamieszkania. Podejście to wymaga ostatecznie obserwacji wielu planet w układach, w tym tych, które nie nadają się do zamieszkania. Strategia, która poszukuje nie tylko planet podobnych do Ziemi, ale także kontekstu niezbędnego do rozwoju systemów planetarnych nadających się do zamieszkania (Kasting, 1988), prawdopodobnie doprowadzi nas w najbardziej bezpośredni sposób do pierwszego dowodu na to, że nie jesteśmy sami we wszechświecie.

W niniejszym artykule wykorzystano model spektroskopowy.

Ziemi, wraz z innymi danymi planetarnymi, w celu oceny obiecujących zakresów długości fal i cech spektralnych dla oddzielenia planet nadających się do zamieszkania od planet niezdalnych do zamieszkania oraz dla charakterystyki środowisk planetarnych. W szczególności kwestia względnej przydatności widma optycznego w porównaniu z widmem podczerwonym ma kluczowe znaczenie dla projektowania misji i została tutaj omówiona w ujęciu ilościowym. Niniejszy artykuł zawiera również przydatne algorytmy do analizy cech spektralnych istotnych dla kwestii zdolności planety do podtrzymywania życia. Po omówieniu interpretacji widma widzialnego i podczerwonego planet ziemskich naszego Układu Słonecznego, widmo atmosfer planet ziemskich zostaje podzielone według cech pasm molekularnych w podczerwieni i widzialnym świetle na kluczowe składniki — gazy, takie jak woda, dwutlenek węgla i związki tlenu, oraz chmury. Omówiono naszą wiedzę na temat sygnatury spektralnej powierzchni planet ziemskich, znanych i domniemych, a na koniec podsumowano zalecenia dotyczące programów TPF/Darwin oparte na analizach przedstawionych we wcześniejszych sekcjach.

Prezentację tę należy traktować jako ocenę aktualnego stanu wiedzy w zakresie zdalnego wykrywania planet nadających się do zamieszkania i życia za pomocą spektroskopii. Podobnie jak ostatnie przełomowe osiągnięcia koncepcyjne i technologiczne zrewolucjonizowały współczesną

astronomii, przewidujemy, że przyszłe osiągnięcia rzeczywiście zrewolucjonizują nasze poszukiwania życia w innych miejscach.

INTERPRETACJA WIDZIALNYCH I PODCZERWONYCH SPEKTRÓW PLANET ZIEMSKICH

Prosta obserwacja, że planeta znajduje się w pewnej odległości od gwiazdy, pozwoli ustalić, czy planeta ta znajduje się w z góry określonej strefie zamieszkalnej gwiazdy (która może, ale nie musi wyznaczać obszar, w którym możliwe jest życie), ale w rzeczywistości daje jedynie bardzo przybliżone oszacowanie temperatury. Istnieją dwie interesujące nas temperatury: temperatura efektywna (temperatura ciała doskonale czarnego o tej samej powierzchni i tej samej całkowitej mocy promieniowania cieplnego) oraz temperatura powierzchniowa (definiowana jako temperatura na styku atmosfery i powierzchni stałej). Ogólnie rzecz biorąc, jeśli występuje efekt cieplarniany (np. spowodowany przez CO_2 , H_2O , CH_4 lub aerozole), temperatura powierzchni będzie wyższa niż temperatura efektywna. Temperatura efektywna jest określana przez jasność gwiazdy, odległość R od gwiazdy, albedo A oraz to, czy średnia roczna różnica temperatur między dniem a nocą na poziomie promieniowania (DT_{D-N}) jest mała (jak w przypadku szybko obracającej się planety lub planety z gęstą atmosferą) czy duża (jak w przypadku wolno obracającej się planety lub planety z rzadką atmosferą). Nasz Układ Słoneczny oferuje następujące przykłady:

Wenus: R 5 0,72 AU, A 5 0,80 6 0,02
(Tomasko, 1980), DT_{D-N} jest małe

Ziemia: R 5 1,00 AU, A 5 0,297 6 0,005
(Goode *et al.*, 2001), DT_{D-N} jest mały

Mars: R 5 1,52 AU, A 5 0,214 6 0,063
(Kieffer *et al.*, 1977), DT_{D-N} jest duże

Jeśli założymy, że mamy planetę mieszczącą się w tym zakresie wartości, ale o nieznanach konkretnych wartościach R , A i DT_{D-N} , wówczas przewidywane temperatury efektywne będą mieścić się w zakresie 202 K, co jest wartością niemal bezużytecznie dużą. Jeśli założymy, że znamy dokładnie wartości R , A lub DT_{D-N} , wówczas przewidywany zakres spada odpowiednio do 123, 159 lub 169, co pokazuje, że najważniejszym parametrem jest R , następnie A , a na końcu DT_{D-N} . Jeśli znamy R z obserwacji fizycznych za pomocą TPF/Darwin, wówczas zakres możliwych temperatur efektywnych spada do 123 K, co nadal jest dość dużym zakresem. Wreszcie, zakładając, że znamy co najmniej dwa

z tych parametrów, zakres spada do 75K, jeśli znamy DT_{D-N} , i do 70K, jeśli znamy A . Oczywiście, jeśli znamy wszystkie trzy parametry, niepewność formalnie spada do 0. Rzeczywiste niepewności będą zawsze większe, jeśli weźmie się pod uwagę błędy pomiarowe.

Z definicji możemy określić A , jeśli zmierzmy zarówno strumień widzialny, jak i strumień podczerwony, co natychmiast przemawia za projektem TPF/Darwin zdolnym do obserwacji w obu częściach widma elektromagnetycznego. Możemy określić DT_{D-N} za pomocą jednej z dwóch metod. Możemy zmierzyć strumień promieniowania podczerwonego w dwóch lub więcej punktach orbity (patrzac odpowiednio na stronę dzienną i nocną) lub możemy zmierzyć strumień widzialny w dwóch lub więcej punktach cyklu dobowego planety o rozpoznawalnych cechach powierzchni wskazujących na prędkość obrotową. Metody te działają doskonale, jeśli obserwator znajduje się w pobliżu płaszczyzny orbity, a źle, jeśli obserwator znajduje się w pobliżu bieguna orbity.

Jeśli chodzi o poszukiwanie życia, ograniczenie temperatury powierzchni planety ma znacznie większe znaczenie niż ograniczenie temperatury efektywnej. Na przykład zarówno Wenus, jak i Ziemia mają podobne temperatury efektywne (odpowiednio 220 K i 255 K), ale znacznie różne temperatury powierzchniowe (odpowiednio 730 K i 290 K) ze względu na różnice w stężeniu gazów cieplarnianych w atmosferze. Widmo widzialne i/lub podczerwone może pomóc w interpretacji tych przypadków, ale żadne z nich nie jest w stanie przeniknąć przez chmury, dlatego też warunki panujące na powierzchni mogą być trudne do oszacowania.

Jednakże inne ważne cechy planety można rozpoznać na podstawie widm. Znając widmo planety pozasłonecznej, można wywnioskować warunki fizyczne i skład warstwy, w której głębokość optyczna jest bliska jedności, przy długości fali obserwacji. Obserwacje w podczerwieni ciągłego promieniowania dają temperaturę barwową. Równając ją z temperaturą fizyczną, możemy wywnioskować rozmiar planety na podstawie emisji podczerwieni, ale profile pasm spektralnych podczerwieni są silnie uzależnione od szczegółów struktury termicznej atmosfery. Dlatego też, chociaż pasma spektralne mogą być wykorzystane do określenia obecności lub niemal całkowitego braku składników atmosfery oraz do ograniczenia struktury termicznej, nie nadają się one do określania ilościowego występowania tych składników.

Ciągłość widzialna/bliska podczerwień może dać określony związek między rozmiarem a współczynnikiem odbicia (albedo) planety w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni. Właściwości poszczególnych pasm mogą pozwolić na wywnioskowanie rozmiaru planety, albedo i temperatury. Intensywność cech absorpcji widzialnej/bliskiej podczerwieni

nie mają wpływu na strukturę termiczną, dlatego nadają się do określania obfitości, ale są znacznie mniej bezpośrednią miarą temperatury planety niż część widma termicznego IR. Połączenie obserwacji w zakresie IR i widzialnym jest oczywiście najbardziej wartościowe: żadna z tych dziedzin nie dostarcza wszystkich informacji, a każda z nich wymaga modelowania w celu interpretacji. Istnieje jednak obawa, że Ziemia jest planetą szczególnie łatwą do interpretacji na podstawie obserwacji zewnętrznych. Planety, które różnią się wielkością, izolacją lub proporcją lądów i oceanów, mogą mieć większe zachmurzenie i z tego powodu być znacznie trudniejsze do interpretacji, jak miało to miejsce w przypadku wczesnych badań Wenus (Cruikshank, 1983). Ostatecznie prawdopodobnie konieczne będą dodatkowe obserwacje za pomocą bardzo dużych interferometrów kosmicznych w zakresie fal milimetrowych, aby określić temperatury powierzchni planet pokrytych chmurami, podczas gdy w przypadku planet o znacznych obszarach bezchmurnych warunki powierzchniowe powinny być rozpoznawane przez system TPF/Darwin w zakresie widzialnym i podczerwonym. Jednakże, aby uzyskać wiarygodne wyniki pomiarów temperatur powierzchniowych, konieczne jest stworzenie modeli widm i wyznaczenie temperatur dla planet modelowych, a także przeprowadzenie programów obserwacyjnych z wykorzystaniem planet naszego Układu Słonecznego jako obiektów testowych. planet pozasłonecznych można mieć pewność.

Obserwacje na odległościach międzygwiazdowych pozwalają rozróżnić tylko te planety, których zdolność do podtrzymywania życia jest widoczna na podstawie obserwacji promieniowania odbitego lub emitowanego. Planety o powierzchniach nadających się do zamieszkania, które są ukryte przez głębokie, całkowicie nieprzezroczyste atmosfery lub których tylko niewielka część powierzchni jest widoczna, prawdopodobnie nie mogą być uznane za nadające się do zamieszkania. Jesteśmy ograniczeni do badania zdolności do życia tylko tych planet, które są zdolne do życia w skali globalnej i które mają w większości przejrzystą atmosferę w znacznej części widma optycznego lub podczerwonego, lub w obu tych zakresach. Ponieważ występowanie planet zdolnych do życia w stosunku do całkowitej liczby gwiazd posiadających układy planetarne jest obecnie nieznane, pozwalamy sobie na popełnienie błędu polegającego na założeniu, że planeta jest niezdolna do życia, podczas gdy w rzeczywistości jest zdolna do życia lub zamieszkania. Bardziej martwi nas popełnienie innego rodzaju błędu, czyli stwierdzenie, że planeta jest nadająca się do zamieszkania lub zamieszkania, podczas gdy w rzeczywistości tak nie jest.

Powierzchnie planet ukryte przez nieprzezroczyste chmury można badać przy użyciu fal o długości wystarczającej do przeniknięcia przez chmury. W praktyce wymaga to obserwacji w zakresie dalekiej podczerwieni lub fal milimetrowych. W przypadku planet pozasłonecznych nie jest to możliwe przy użyciu obecnej technologii.

ponieważ wymagałoby to zastosowania interferometrycznych reflektorów o bardzo dużych średnicach i bazach. Z drugiej strony, jeśli można określić temperaturę powierzchni, wówczas do rozróżnienia cech powierzchni od cech obserwowanych na wyższych poziomach atmosfery można wykorzystać długości fal, które nie przenikają do powierzchni. Jeśli obserwowalne górne warstwy troposfery, odpowiadające miejscu, w którym temperatura spada wraz z wysokością od powierzchni w górę, wydają się być umiarkowanie zbliżone do nasycenia parą wodną, możliwe jest określenie przybliżonych cech na poziomie gruntu. Aby to zrobić, należy założyć, że atmosfera znajduje się w równowadze konwekcyjnej z adiabatą moką. Z drugiej strony, jeśli można obserwować tylko stratosferę z powodu optycznie gęstego smogu fotochemicznego, zasadniczo niemożliwe jest ekstrapolowanie warunków stratosferycznych na powierzchnię. Zarówno Wenus, jak i Tytan są całkowicie spowite chmurami fotochemicznymi, a do określenia warunków panujących w ich niższych warstwach atmosfery i na powierzchni konieczne było zbliżenie statków kosmicznych i zastosowanie technik *in situ* (Lindal *et al.*, 1983; Seiff, 1983). Ponadto, ponieważ możliwe jest występowanie warstwy atmosferycznej o niskiej wilgotności nad warstwą o wysokiej wilgotności związanej z trwałym odwróceniem temperatury atmosferycznej (np. stratosfera nad tropopauzą na Ziemi), nie można stwierdzić, że sucha górna atmosfera oznacza suchą powierzchnię.

Zachmurzenie na danej planecie zależy od struktury atmosfery, jej składu i wzorców cyrkulacji. Chociaż większe ciała niebieskie mają zazwyczaj gęstszą atmosferę i więcej chmur, znaczenie ma również odległość od gwiazdy macierzystej: porównajmy Merkurego i Tytana, ciała niebieskie o podobnej wielkości. Spośród dwóch większych planet ziemskich w naszym układzie jedna jest w około połowie pokryta chmurami (Ziemia), a druga jest całkowicie pokryta chmurami (Wenus). W przypadku niewielkiego i średniego pokrycia chmurami można dość dobrze określić cechy powierzchni. W przypadku rozległych chmur możemy określić jedynie cechy warstwy chmur i obszarów powyżej niej. Nie jest jeszcze jasne, czy pokrycie chmurami utrzymywane przez procesy konwekcyjne zazwyczaj powoduje powstanie atmosfery z rozległymi obszarami wolnymi od chmur, ale co najmniej dwa obiekty Układu Słonecznego (Ziemia i Jowisz) wykazują takie zachowanie.

W dalszej części rozważymy informacje...

informacje o planetach pozasłonecznych, które można uzyskać odpowiednio z widma podczerwonego i widma widzialnego, osobno, a następnie łącznie.

rozpocniemy od rozważenia informacji dostępnych z kontinuum, a następnie przejdziemy do pasm spektralnych.

Obserwacje kontinuum

Najpierw próbujemy określić orbitę planety, aby oszacować nasłonecznienie, czyli energię dostarczaną na jednostkę powierzchni. Zarówno pomiary w zakresie widzialnym, jak i podczerwonym mogą dać rzutowaną orbitę. Na tej podstawie powinno być możliwe wywnioskowanie prawdziwej orbity. Nawet bez tego powinno być możliwe określenie maksymalnego wydłużenia, a przy założeniu orbity kołowej wydłużenie to jest bezpośrednią miarą odległości między planetą a gwiazdą. Dzięki tym informacjom znamy nasłonecznienie i możemy wykorzystać obserwacje kontinuum spektralnego do określenia, jak środowisko termiczne planety ma się do odpowiednich planet Układu Słonecznego.

Obserwacje kontinuum mogą być również wykorzystane do oszacowania promieni i mas planet (patrz poniżej). Jak wyjaśniono wcześniej (patrz Podstawowe cele naukowe w poszukiwaniu spektralnych sygnatur życia pozasłonecznego oraz szeroka różnorodność planet ziemskich), znajomość tych właściwości jest również ważna, ponieważ dostarczają one wskazówek dotyczących historii powstawania planety, jej zdolności do utrzymania atmosfery oraz zdolności do sprzyjania życiu.

Oszacowanie promienia planety na podstawie zmierzzonego strumienia promieniowania w średniej podczerwieni jest proste. Na podstawie obserwacji w zakresie średniej podczerwieni możemy oczekiwać pomiaru temperatury barwowej na podstawie kształtu widma. Temperatura ta może być temperaturą powierzchni, niskich chmur lub wysokich chmur. Równając temperaturę barwową dla wybranych obszarów widma z temperaturą fizyczną i wykorzystując obserwowany strumień, możemy zastosować prawo Plancka, aby uzyskać powierzchnię, a tym samym promień planety. Aby wywnioskować prawdopodobną masę planety, możemy wykorzystać obserwowaną w Układzie Słonecznym zależność między masą, promieniem i środowiskiem termicznym. Chociaż wzięliśmy pod uwagę, że obecność pierścieni lub satelitów może zafałszować nasz wynik, oczekujemy, że obserwacje kontinuum podczerwieni pozwolą określić promień planety z dokładnością do 10%.

Znając rozmiar i temperaturę, możemy obliczyć później całkowitą emisję powierzchniową i porównać ją z nasłonecznieniem. Porównanie to pozwoli nam uzyskać albedo Bonda (równania 1 i 2). Niech r_{pl} 5 promień planety (nieznany), A 5 albedo (nieznane), D 5 odległość do układu planetarnego, L^* 5 strumień integralny gwiazdy na Ziemi, u 5 kąt maksymalnej elon-

, T 5 obserwowana temperatura barwowa, $F(l)$ 5 obserwowany strumień cieplny planety przy długości fali l , a $B(l, T)$ 5 funkcja Plancka przy długości fali l dla temperatury T . Wówczas otrzymujemy

$$(r_{pl}/D)^2 \approx 5 F(l)/pB(l, T) \quad (1)$$

oraz

$$1/2 A \approx 5 [(D/r_{pl})^2 u^2 / 4E] F(l) dl / L^* \quad (2)$$

Na podstawie albedo możemy stwierdzić, czy pokrywa chmur planety przypomina pokrywę Księżyca, Marsa, Ziemi czy Wenus. Jednak w przeszłości Ziemia przechodziła fazę ochłodzenia, podczas której miała wysokie albedo (z powodu lodu) i niską temperaturę powierzchni. Nie mogliśmy odróżnić takiej śnieżnej kuli ziemskiej od planety podobnej do Wenus wyłącznie na podstawie albedo; do rozróżnienia lodu wodnego od kropeł kwasu siarkowego potrzebne byłyby widma. Bez widma, gdyby albedo było wysokie, wiedzielibyśmy, że albo określamy charakterystykę wierzchołków chmur, albo widzimy planetę pokrytą lodem. Gdyby albedo było niskie, wydawałoby się prawdopodobne, że widzimy powierzchnię i określamy jej charakterystykę. Gdyby albedo było pośrednie, moglibyśmy oczekiwać, że nie doceniamy temperatury powierzchni, ale nie w znacznym stopniu.

W zakresie fal widzialnych i bliskiej podczerwieni promień i masa planety mogą być oszacowane na podstawie jej jasności lub kolorów. Układ Słoneczny stanowi ramy, w których można opracować metody dokonywania takich szacunków. Planety gazowe i planety ziemskie można łatwo rozróżnić na podstawie ich jasności (funkcji powierzchni, albedo i fazy) oraz odległości orbitalnej. Biorąc pod uwagę stosunek powierzchni Jowisza do Ziemi i zakładając takie samo albedo, Jowisz byłby 120 razy jaśniejszy od Ziemi przy tej samej odległości orbitalnej. O ile albedo planet olbrzymich nie jest 10–100 razy mniejsze od albedo planet ziemskich, pomylenie planet olbrzymich z planetami ziemskimi jest mało prawdopodobne. Wykorzystując przybliżone oszacowanie promienia na podstawie jasności widocznej i zakładając pewną gęstość, można ograniczyć „masę fotometryczną”. Alternatywnie, masę planety można oszacować na podstawie fotometrii o niskiej rozdzielczości, uzyskując „masę barwną” (nazwaną tak przez analogię do temperatury barwowej w podczerwieni). Kluczową ideą jest to, że kolor planety może wskazywać, czy jest to planeta olbrzymia, czy ziemsko-podobna, w oparciu o nasze doświadczenia z konkretnymi specyfikacjami.

właściwości planet i atmosfer w naszym Układzie Słonecznym, jak omówiono poniżej.

Chociaż nasz Układ Słoneczny stanowi dobry wzorzec do interpretacji jasności i masy barwnej, prawdopodobnie istnieje znacznie większa różnorodność planet, co utrudnia wykorzystanie tych danych do oszacowania promieni i mas planet. Na przykład Ziemia miała bardzo różne cechy charakterystyczne w różnych okresach geologicznych. Postulowana „śnieżna kula ziemską” w eonie neoproterozoicznym miałaby bardzo wysokie albedo (Hoffman *et al.*, 1998). Atmosfera Ziemi mogła zawierać większy udział metanu w eonie archaiku [przed 2,5 miliardami lat (Kasting i Brown, 1998)] i dlatego wykazywała niezwykle silne cechy spektralne metanu. Kolejnym wyjątkiem od wzorca Układu Słonecznego jest lodowy Uranus, znajdujący się na zewnętrznej granicy strefy zamieszkalnej. Silne odchylenia od sygnatur spektralnych gazowych gigantów Układu Słonecznego są również spodziewane w przypadku młodych, gorących Jowiszów. Pomimo spodziewanych niepewności, masa fotometryczna i masa barwna razem dają nadzieję na oszacowanie masy planety.

Temperatura powierzchni planety ziemskiej można określić na podstawie obserwacji w podczerwieni tylko w bardzo ograniczonym zakresie warunków. W przypadku obecnej Ziemi można ją uzyskać w miarę dobrze, zasadniczo poprzez obserwacje w zakresie „okna” 8–12 mm. Jednak nawet obecnie występuje pewna absorpcja przez skrzydła pasm pary wodnej w obszarze okna. Gdyby temperatura powierzchni wzrosła umiarkowanie, ilość wody znacznie by wzrosła i ostatecznie powierzchnia nie byłaby już widoczna, nawet w tym obszarze okna. Obserwowana emisja pochodziłaby wówczas z obszaru położonego kilka wysokości skali wodnej wyżej w atmosferze. Dałoby to zmierzoną temperaturę znacznie niższą od rzeczywistej temperatury powierzchni. Dlatego w przypadku planet znacznie cieplejszych od Ziemi nie można określić temperatury powierzchni na podstawie obserwacji w podczerwieni. Oczywiście takie ciepłe warunki mogłyby spowodować katastrofalną przemianę efektu cieplarnianego z warunków podobnych do ziemskich na warunki podobne do wenusjańskich.

Alternatywnie, jeśli weźmiemy pod uwagę bardziej masywną planetę większą od Marsa, ale otrzymującą promieniowanie słoneczne podobne do Marsa, temperatura powierzchni będzie podobna do ziemskiej tylko wtedy, gdy efekt cieplarniany planety będzie znacznie większy niż na Ziemi, w którym to przypadku temperatura powierzchni prawdopodobnie nie będzie dostępna dla obserwacji w podczerwieni. Lub, jeśli mamy małą planetę z rzadką atmosferą, ale otrzymującą promieniowanie słoneczne podobne do Wenus, wówczas wilgotna planeta osiągnie

temperaturę ciała doskonale czarnego wynoszącą 300 K, a wraz z ociepleniem spowodowanym efektem cieplarnianym ilość wody w atmosferze prawdopodobnie sprawi, że temperatura powierzchni będzie nieokreślona.

W żadnym z tych przypadków obecność tlenu nie może być interpretowana jako jednoznaczny znak życia, ponieważ tlen pochodzenia niebiologicznego może gromadzić się na dużej planecie pokrytej lodem (Des Marais, 1997; Kasting, 1997). Lód zapobiega jego wchłanianiu przez skały powierzchniowe. Jednak większa planeta prawdopodobnie posiada wulkany i wyziewy wulkaniczne o składzie chemicznym, który ma działanie redukujące, a zatem usuwa wszelkie niebiologiczne zasoby tlenu. W związku z tym może istnieć tylko bardzo niewielki zakres warunków planetarnych, które mogą dać fałszywie pozytywny wynik dla tlenu. Tlen niebiologiczny może również pojawić się na gorącej planecie przechodzącej katastrofalną przemianę cieplarnianą (Kasting, 1988). W miarę ogrzewania się atmosfery temperatura tropopauzy pozostaje stała, ale tropopauza przesuwana się na duże wysokości, gdzie ciśnienie jest niskie (Ingersoll, 1969). W ten sposób współczynnik nasycenia pary wodnej, który jest równy ciśnieniu pary podzielonemu przez ciśnienie otoczenia, staje się wysoki. Stratosfera staje się wilgotna, a para wodna osiąga duże wysokości, gdzie łatwo ulega dysocjacji, traci wodór, a tlen pozostaje, aż do momentu reakcji z skałami powierzchniowymi. Jednak tropopauza Ziemi znajduje się w temperaturze 210 K, wystarczająco niskiej, aby utrzymać stratosferę w stanie dość suchym na wysokościach, gdzie woda jest narażona na znaczne promieniowanie UV. To również może dać fałszywie pozytywny wynik w wykrywaniu życia. Oba te warunki można rozróżnić na podstawie tego, że planeta znajduje się poza strefą zamieszkalną, dlatego prawdopodobnie możemy odróżnić wyniki prawdziwie pozytywne od fałszywie pozytywnych.

Podsumowując, pierwszym i najbardziej znanym aspektem

planety na podstawie obserwacji w podczerwieni jest jej rozmiar. Na podstawie rozmiaru, nasłonecznienia i zintegrowanej emisji możemy określić zarówno albedo, jak i temperaturę związaną z warstwą emisyjną. Na podstawie tych trzech parametrów można ustalić, czy obserwowany obszar znajduje się blisko powierzchni ziemi, czy też jest to warstwa wysoko w atmosferze. Jeśli jest to warstwa górna, interpretacja cech powierzchni jest czasami możliwa, ale są też przypadki, w których jest to niemożliwe.

Obserwacje pasm

Obserwacje pasm molekularnych w niskiej rozdzielczości dostarczają najwięcej informacji na temat obfitości

materiałów. Siła pasm zmienia się zarówno wraz z ilością materiału, jak i ciśnieniem atmosferycznym. W przypadku prawdopodobnych planet szerokość poszczególnych linii w paśmie będzie zmieniać się liniowo wraz z ciśnieniem, ale absorpcja z danej linii będzie zmieniać się wraz z pierwiastkiem kwadratowym z obfitości materiału. Krzywa wzrostu (czyli zależność między obfitością gatunku a intensywnością jednego z jego pasm) będzie w większości swojego zakresu spełniać zależność, zgodnie z którą siła pasma jest proporcjonalna do ciśnienia, a także do pierwiastka kwadratowego z obfitości kolumny gazu. W takiej zależności samoczynne poszerzenie wywołane ciśnieniem jest około dwa razy bardziej skuteczne niż poszerzenie spowodowane przez inny gaz. Te dwie wielkości nie mogą być rozdzielone, chyba że ciśnienie atmosferyczne jest bardzo niskie i dominuje poszerzenie dopplerowskie. Taka sytuacja wystąpi tylko w przypadku słabych pasm spektralnych w zakresie widzialnym. (Poszerzenie ciśnieniowe jest bezpośrednio związane z częstotliwością zderzeń cząsteczek, podczas gdy poszerzenie dopplerowskie jest proporcjonalne do częstotliwości linii, która będzie największa w zakresie widzialnym). Z tego powodu ogólnie trudno będzie precyzyjnie określić znaczenie obserwowanej siły pasma w kategoriach obfitości.

Jeszcze trudniej jest zinterpretować siłę pasma w zakresie spektralnym średniej podczerwieni. Tam materiał pochłaniający również emituje. Pasma absorpcyjne wykazuje stale wyższą nieprzezroczystość w kierunku swojego środka. Zatem profil pasma faktycznie wskazuje pionową strukturę temperatury nad regionem emitującym kontinuum. Niektóre cechy, takie jak centralna inwersja lub brak inwersji, mogą dostarczać informacji o pionowej strukturze temperatury w atmosferze. Na przykład centralna inwersja w paśmie 15 mm CO₂ na Ziemi jest spowodowana wzrostem temperatury od tropopauzy do stratosfery, który z kolei jest spowodowany pochłanianiem światła słonecznego przez O₃. Informacje takie mogłyby na przykład potwierdzić faktyczną obecność O₃.

Absorpcja przez wodę stanowi interesujące wyzwanie interpretacyjne. Absorpcję wody obserwuje się w widmach bliskiej podczerwieni chłodnych gwiazd olbrzymów i brązowych karłów. Pasma są takie same jak te widoczne w widmie Ziemi, ale są nieco szersze, a zatem modyfikują widoczny kształt kontinuum między pasmami. Pasma sugerują określoną wartość iloczynu ciśnienia i pierwiastka kwadratowego z obfitości wody. Woda mogłaby być nasycona, gdyby była wystarczająco obfita, co jest raczej nieprecyzyjnym stwierdzeniem

, ponieważ prężność pary zmienia się od temperatury zamarzania do temperatury wrzenia o współczynnik 180. Dlatego też, aby wykorzystać informacje o sile pasm wodnych, potrzebny jest dość precyzyjny pomiar temperatury.

Szerokość pasm wody i tlenu prawie nie zmienia się wraz z temperaturą, więc nie można ich używać do określania temperatury. Bardziej prawdopodobne jest, że siłę pasm wody można wykorzystać do określenia przybliżonego zakresu temperatur i ciśnień. Ilość wody zależy od ciśnienia pary, więc prawdopodobnie istnieje pewna dolna granica temperatury wynikająca z utrzymania rozsądnego ciśnienia atmosferycznego. Te zależności wymagają zbadania.

W zakresie średniej podczerwieni krótka długość fali kontinuum rotacyjnego pokrywa się z długą długością fali pasma CO₂ 15 mm. Dlatego obserwowaną wielkością jest głębokość spadku na tej długiej długości fali. Dostarcza ona informacji o temperaturze, przy której nieprzezroczystość wody jest w przybliżeniu równa jedności, patrząc z góry. Jeśli założymy atmosferę nasyconą, to im niższe ciśnienie atmosferyczne, tym mniejsza będzie różnica temperatur między końcami tego pasma o krótkiej i długiej długości fali. Zależność między cechami pasma a oszacowaniem temperatury, dokonany na podstawie obserwacji kontinuum, wymaga dalszych badań. Takie obserwacje mogą dostarczyć oszacowań ciśnienia również na poziomach atmosfery, na których pasmo wodne jest widoczne.

Określanie parametrów na podstawie pasm widzialnych i bliskiej podczerwieni

Oprócz pasm, konieczne jest rozpoczęcie od przybliżonego określenia wielkości planety. Jasność wizualna planety i jej roczna zmienność fazowa mogą posłużyć do wyznaczenia wielkości $A(r_{pl})^2$. Potrzebujemy g , przyspieszenia grawitacyjnego na powierzchni planety.

Niech r będzie średnią gęstością planety:

$$g \approx \frac{4}{3} G r_{pl} \rho \quad (3)$$

Możemy przyjąć $r \approx 5$ jako pierwsze przybliżenie dla planety ziemskiej. Zatem g zmienia się tylko wraz z pierwiastkiem kwadratowym z A . Oznacza to, że niepewność wynosi około 61,7.

Istnieją dwa rodzaje cząsteczek: te, które różnią się współczynnikami mieszania (H₂O i O₃) oraz te, które mają stały współczynnik mieszania. W przypadku gazów

stałych proporcjach mieszania i tworzących pasma, możemy wykorzystać tlen i dwutlenek węgla do oszacowania całkowitego ciśnienia, zakładając, że proporcja mieszania wynosi jedność (czyli zakładamy, że mamy atmosferę czystego O_2 lub CO_2). Da to dolną granicę ciśnienia na powierzchni widoku. A ponieważ ciśnienie gazu zmienia się liniowo wraz z T , możemy założyć pewną średnią T

,260 K (rozsądne przybliżenie dla Ziemi, Wenus lub Marsa), biorąc pod uwagę fakt, że zdecydowaliśmy się badać tylko planety w strefie potencjalnie nadającej się do zamieszkania.

W przypadku $H_2 O$ musimy założyć wysokość skały (dla temperatur ziemskich wynosi ona około jednej piątej wysokości skały atmosferycznej z powodu kondensacji). W ten sposób, wykorzystując właśnie określone ciśnienie powierzchniowe i siłę pasma $H_2 O$, możemy określić ciśnienie pary wodnej na powierzchni. Można to następnie przełożyć na lepszą temperaturę, zakładając, że atmosfera jest nasycona w 50%. Następnie temperaturę tę można wprowadzić z powrotem do określenia ciśnienia i powtórzyć proces.

Wskazane byłoby wykorzystanie tego procesu do porównania z obserwacjami Ziemi, Marsa i Wenus, a także symulacjami „mniejszej” Wenus i „większego” Marsa, aby zbadać jakość wyników. Rzeczywiście, niezbędnym etapem tej pracy jest walidacja zarówno procesów widzialnych, jak i podczerwonych.

Wpływ pierścieni pyłowych, planet podwójnych i smug pyłowych

Wyprowadzenie albedo A planety na podstawie jej promienia r_{pl} i strumienia odbitego $F_r = 5 A r_{pl}^2 f(t)$ [gdzie $f(t)$ jest współczynnikiem fazy orbitalnej] zakłada, że planeta jest kulista. Założenie to nie jest prawdziwe, jeśli wokół planety znajdują się pierścienie i/lub planeta posiada satelitę. W tym drugim przypadku może to być satelita mniejszy od planety, jak w przypadku Ziemi, Jowisza i Saturna. Jednak różnorodność odkrytych już układów planetarnych pozostawia otwartą możliwość, że niektóre towarzyszące planety pozasłoneczne mogą być tak duże jak sama planeta („planety podwójne”); para Pluton–Charon w Układzie Słonecznym prawie się do tego kwalifikuje. Chociaż żywotność pierścieni może być krótka (10^4 lat), nie można wykluczyć, że są one stale uzupełniane. W tych dwóch przypadkach albedo planety oszacowane na podstawie jej strumienia odbitego (lub jej promienia wyprowadzonego z oszacowanego lub „przypuszczalnego” albedo) będzie nieprawidłowe. Zaproponowano „środki zaradcze”, które ad-

rozwiązać te potencjalne źródła błędów (Schneider, 1999).

Kwestie te zostały bardziej szczegółowo omówione w innych publikacjach (Des Marais *et al.*, 2001). Poniżej przedstawiamy krótkie podsumowanie najważniejszych wyników. Chmury pyłu poruszające się za planetami zostały omówione przez Beichmana *i innych* (1999). W przypadku chmury podobnej do tej, która obecnie, jak się uważa, pozostaje w tyle za Ziemią, strumień wynosi 10% strumienia Ziemi. Jednak w układach zawierających znacznie więcej pyłu, pył ten zakłócałby obserwacje w podczerwieni, a także obrazowanie w zakresie widzialnym przy niskiej rozdzielczości kątowej po apodizacji.

Obserwacje w zakresie widzialnym pozwalają odróżnić efekty pierścieni od efektów planet podwójnych lub księżyców. Pierścienie prawdopodobnie będą miały charakterystyczny kształt w efekcie fazowym. Zaćmienia mogą ujawnić księżycy i planety podwójne. Takie informacje byłyby pomocne w określeniu parametrów układu księżyc-planeta.

W zakresie średniej podczerwieni wpływ księżycy wielkości Ziemi byłby stosunkowo nieistotny, ale większy księżyc spowodowałby zmiany w charakterystyce widmowej, której intensywność zmieniałaby się w ciągu roku, a temperatura również wydawałaby się zmieniać w tym cyklu. Planeta na orbicie ekscentrycznej wykazywałaby zmiany temperatury, ale nie zanik cech widmowych. Wysokoprecyzyjne pomiary pozycji wykonywane w ramach badań planet mogą pomóc w rozróżnieniu różnych efektów i wywnioskowaniu masy planety.

Podsumowanie

Zbadaliśmy potencjalne wykorzystanie zarówno widm widzialnych/bliskiej podczerwieni, jak i widm średniej podczerwieni do interpretacji obserwacji planet ziemskich w obu długościach fal. Szacunki dotyczące wielkości planety i albedo można z całą pewnością określić na podstawie obserwacji w średniej podczerwieni. Parametry te są trudniejsze do określenia na podstawie obserwacji widzialnych, ale można opracować iteracyjne schematy do zbadania tej kwestii, a metody wykorzystujące dowolny zakres długości fal powinny zostać przetestowane w oparciu o rzeczywiste obserwacje i modele.

Określenie temperatury powierzchni jest możliwe tylko wtedy, gdy planeta ma znaczną część powierzchni wolną od chmur. Obecność O_2 i $H_2 O$ można określić na podstawie obu obszarów widma, ale należy zachować ostrożność, aby wykluczyć fałszywie pozytywne wyniki (np. Selsis *et al.*, 2002), w których wykrycie O_2 i O_3 nie jest oznaką życia.

**CECHY PASMA MOLEKULARNEGO W
PODCZERWIENI I ŚWIETLE
WIDZIALNYM**

W tej sekcji wykraczamy poza ogólne rozważania przedstawione powyżej, aby zsyntetyzować konkretne cechy spektralne kluczowych gazów molekularnych spodziewanych w atmosferach planet ziemskich, w warunkach temperatury, ciśnienia i składu Ziemi. Powstała biblioteka cech spektralnych powinna stanowić użyteczny i ilościowy punkt wyjścia do modelowania równoważnych cech zidentyfikowanych w świetle planet pozasłonecznych typu ziemskiego. Czytelnicy, którzy nie są zaznajomieni z analizą linii spektralnych, powinni zapoznać się ze standardowymi podręcznikami z tej dziedziny (Goody i Yung, 1989).

Model

Widma modelowe Ziemi są obliczane za pomocą kodu Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO), pierwotnie opracowanego do analizy widm emisji termicznej dalekiej podczerwieni stratosfery z balonu, a następnie rozszerzonego o widma odbicia widzialnego (Traub i Stier, 1976; Traub i Jucks, 2002). Baza danych linii spektralnych zawiera obszerną kompilację Air Force Geophysical Laboratory oraz ulepszenia pochodzące z materiałów Air Force Geophysical Laboratory sprzed publikacji i innych źródeł. W kilku przypadkach dostępne są dane laboratoryjne, ale nie ma analizy spektroskopowej, dlatego stosujemy empiryczny, tak zwany pseudo-kształt pasma linii. Dalekie skrzydła linii poszerzonych ciśnieniowo mogą być nielorentzowskie przy około 1000-krotności szerokości linii i powyżej; dlatego w niektórych przypadkach (H_2O , CO_2 , N_2) zastępujemy obliczenia liniowe zmierzonymi danymi ciągłymi w tych obszarach. Rozpraszanie pyłu i Rayleigha jest aproksymowane poprzez zastosowanie empirycznych praw mocy długości fali, które wywierają znaczący wpływ w zakresie widzialnych niebieskich długości fal. Atmosfery od 0 do 100 km wysokości są konstruowane na podstawie standardowych modeli, które są dyskretyzowane do odpowiednich warstw atmosferycznych, a dodatkowe metody transferu radiacyjnego są stosowane w celu zapewnienia dokładnego odwzorowania rdzeni linii i warstw optycznie gęstych. Integracja w sferycznej atmosferze ziemskiej jest przybliżona z dokładnością do kilku procent poprzez obliczenia jednopunktowe pod kątem zenitalnym 60° , więc efektywna masa powietrza wynosi 2 w podczerwieni (emisja wychodząca) i 4 w zakresie widzialnym (2 promieniowanie słoneczne przychodzące plus 2 promieniowanie odbite wychodzące). Chmury są reprezentowane poprzez wstawienie warstw pochłaniających/emituujących kontinuum pod odpowiednią wysokością.

Chmury i rozproszone chmury są reprezentowane przez ważoną sumę widm wykorzystujących różne warstwy chmur.

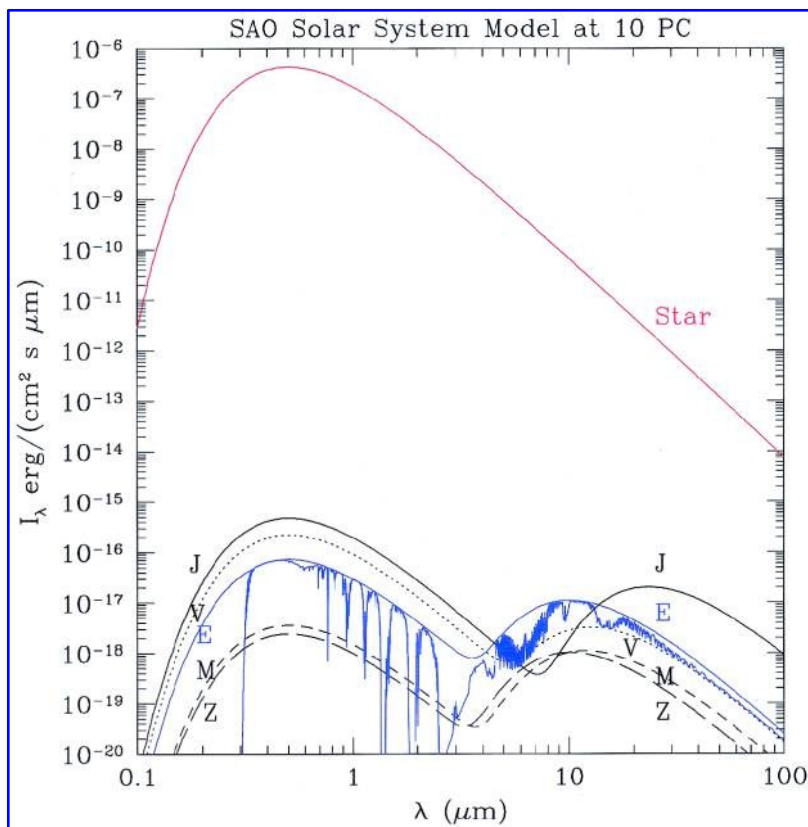
Na rys. 1 przedstawiono prosty model (Traub i Jucks, 2002) widm Słońca i planet Układu Słonecznego widzianych z odległości 10 pc, czyli mniej więcej odległości typowej pobliskiej gwiazdy. Model ten zakłada widma ciągle ciała doskonale czarnego w temperaturze efektywnej każdego obiektu oraz widma odbicia proporcjonalne do albedo widzialnego każdej planety. Składowa światła zodiakalnego jest odpowiednia dla obszaru o średnicy 0,1 AU, którego środek znajduje się w odległości 1,0 AU od gwiazdy centralnej. Dla porównania nałożono charakterystykę absorpcji pasma molekularnego dla atmosfery ziemskiej. Nie podjęto próby modelowania cech innych niż ciała doskonale czarnego, takich jak silne rozpraszanie Rayleigha z Ziemi, cechy molekularne innych planet lub albedo zależne od długości fali.

Na rys. 2 przedstawiono część widma modelowej Ziemi w zakresie podczerwieni widzianą z odległości 10 pc. Cechy pasma i modele chmur zostaną szczegółowo omówione w kolejnych sekcjach. Rysunek 3 przedstawia część widma modelowej Ziemi w zakresie od światła widzialnego do bliskiej podczerwieni, z uwzględnieniem tych samych modeli chmur. Celem rysunków 1–3 jest przedstawienie modelowych widm w jednostkach fizycznych, które można łatwo przeliczyć np. na liczbę fotonów. Wszystkie kolejne rysunki przedstawiają widma w jednostkach względnych emisyjności w podczerwieni lub względnej odbiciowości w zakresie od światła widzialnego do bliskiej podczerwieni, aby podkreślić spektroskopię w przeciwieństwie do strumienia fotometrycznego dla każdej długości fali.

Poniżej przedstawiono wyniki graficzne i opisowe dla każdej cechy atmosferycznej lub gatunku, zarówno w zakresie widma średniej podczerwieni, jak i widzialnej i bliskiej podczerwieni.

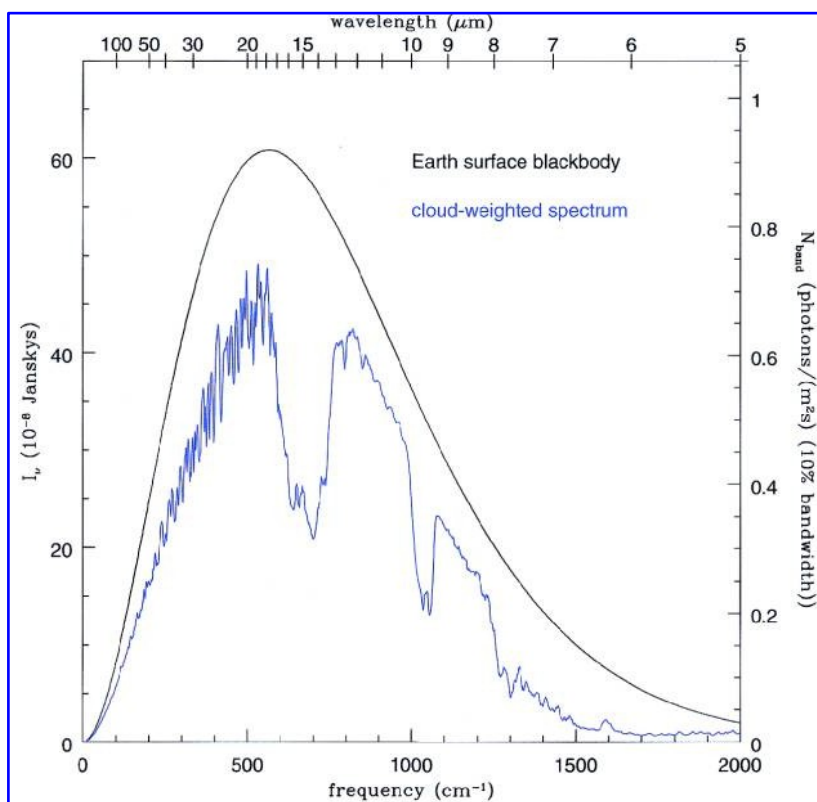
Chmury (rys. 4 i 5)

Model widma Ziemi w podczerwieni na rys. 4 ilustruje łączny wpływ cech absorpcji widmowej i chmur. Widmo atmosfery bezchmurnej (bez chmur) przedstawia górna krzywa, pokazująca, że przy braku chmur możemy penetrować najgłębsze warstwy troposfery i obserwować najcieplejsze (najjaśniejsze) wysokości emisji. Jeśli planeta jest pokryta wysokimi chmurami, na wysokości około tropopauzy, otrzymujemy najniższą krzywą, która jest zasadniczo ciałem doskonale czarnym w temperaturze tropopauzy, z nałożonymi cechami emisji z wyższych, cieplejszych warstw stratosfery.

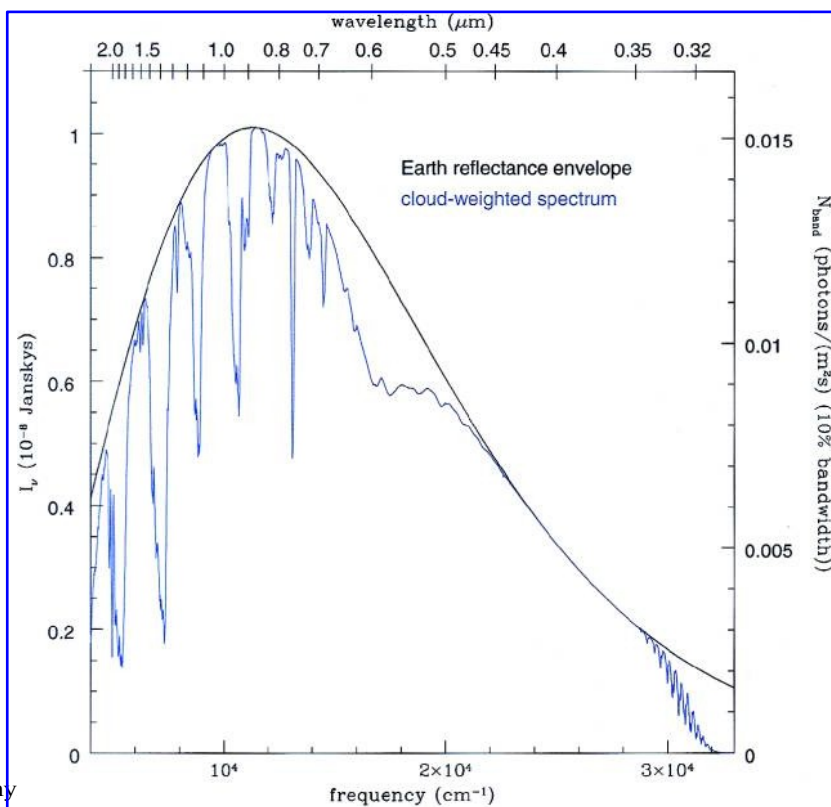


RYŚ. 1. Modelowe widmo Słońca i planet widziane z odległości porównywalnej do odległości pobliskiej gwiazdy (10 pc), pokazane w jednostkach fizycznych. Pokazano proste składowe emisje Plancka i niezależnego od długości fali współczynnika odbicia albedo. W przypadku Ziemi nałożono czyste widmo absorpcji molekularnej dla porównania.

RYŚ. 2. Część widma modelu Ziemi w zakresie podczerwieni, przedstawiająca widmo ciała doskonale czarnego powierzchni Ziemi przy braku atmosfery (górna krzywa) oraz widmo netto po dodaniu dominujących cząsteczek atmosferycznych i realistycznego modelu atmosfery zmieszanego z modelowym rozkładem nieprzezroczystych chmur rozmieszczonych na kilku wysokościach (dolna krzywa). Podano dwie skale intensywności: jednostki astrofizyczne (po lewej) i fotony (po prawej).



RYŚ. 3. Część widzialna i bliska podczerwień widma modelu Ziemi, pokazująca widmo odbicia powierzchni Ziemi i chmur przy braku atmosfery (górna krzywa) oraz widmo netto po dodaniu dominujących cząsteczek atmosferycznych i realistycznego modelu atmosfery zmieszanego z modelowym rozkładem nieprzezroczystych chmur rozmieszczonych na kilku wysokościach (dolna krzywa). Podano dwie skale intensywności: jednostki astrofizyczne (po lewej) i fotony (po prawej).



Krzywe pomiędzy tymi dwoma skrajnymi przedstawiają pokrycie chmurą na średniej wysokości. Gruba (środkowa) krzywa przedstawia łączny efekt średniej ważonej obszarów bezchmurnych i zachmurzonych, aby z grubsza symulować obecną Ziemię. Ten zakres widm pokazuje, że chmury i gazy mogą dominować w widmie średniej podczerwieni. Wszystkie widma podczerwone są wygładzane trójkątowo do rozdzielczości (długość fali w przedziale długości fali) 25.

Modelowe widmo Ziemi dla zakresu widzialnego, przedstawione na rys. 5, pokazuje pięć krzywych reprezentujących widma z powierzchni, a następnie z każdej z trzech warstw chmur oraz średnią ważoną tych składników. Ponieważ zakłada się, że chmury są takie same dla wszystkich długości fal, ich głównym efektem jest zmniejszenie głębokości linii absorpcyjnych. Widma widzialne są wygładzone do rozdzielczości 100 za pomocą funkcji trójkątnej.

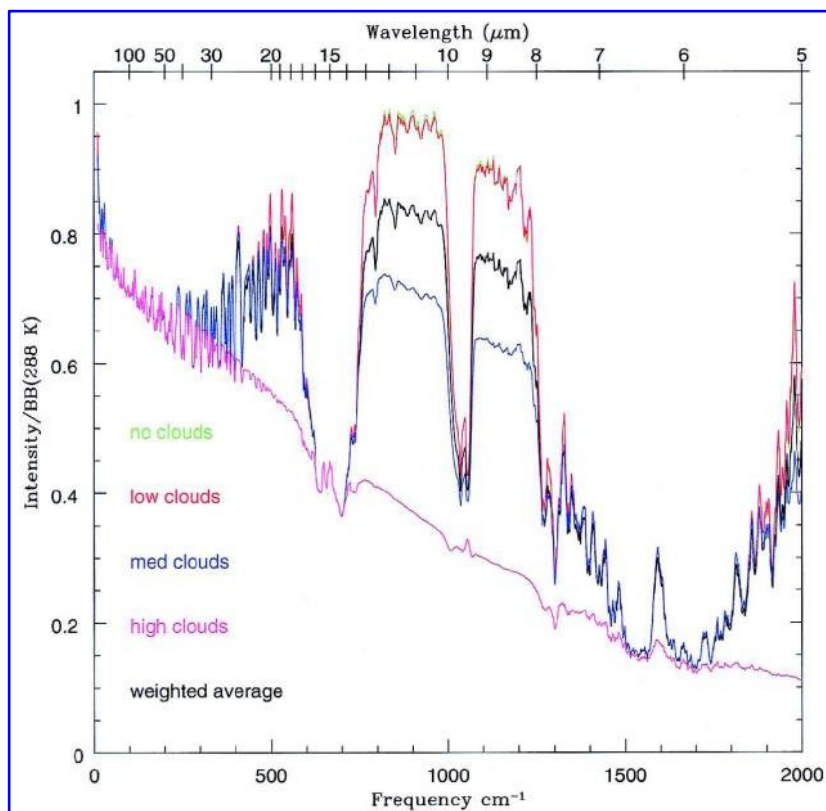
Woda (rys. 6 i 7)

Woda ma obecny poziom atmosferyczny (PAL) wynoszący ,8000 ppm, co odpowiada wilgotności względnej 50% na powierzchni modelu 288K. Para wodna koncentruje się w warstwie o grubości kilku kilometrów w pobliżu źródła wody w stanie ciekłym na powierzchni, spada do minimum kilku części na milion w tropopauzie i wzrasta do ,6 ppm w stratosferze. Wa-

transportu z troposfery, jak i utleniania metanu, który również pochodzi z troposfery. Głębokość optyczna wzrasta w przybliżeniu proporcjonalnie do pierwiastka kwadratowego z obfitości, ponieważ większość linii wodnych jest nasycona. Obfitość H_2O wzrasta wykładniczo wraz z temperaturą, ale jest niezależna od ciśnienia otoczenia. Zatem informacje, które uzyskujemy z pasm H_2O , są mieszanką dostępności H_2O na powierzchni, temperatury powierzchni, aktywności mieszania pionowego, pionowego profilu temperatury i reakcji fotochemicznych.

Widmo średniej podczerwieni H_2O pokazano na rys.

6. Górna krzywa dotyczy zerowej zawartości wody (0 ppm) i jest oczywiście linią płaską, ponieważ mamy tu planetę pozbawioną atmosfery i widzimy powierzchnię o temperaturze 288 K. Głównymi cechami są pasma rotacyjne (1,5 mm i dłuższe długości fal) oraz pasma wibracyjne (5–8 mm). Dodanie troposferycznego H_2O powoduje nieprzezroczystość na wysokościach powyżej powierzchni ziemi, a tym samym niższe temperatury kinetyczne cząsteczek i niższe poziomy emitowanego strumienia, a zatem cechy spektralne, które wydają się być cechami absorpcyjnymi, są w rzeczywistości po prostu emisją z warstw atmosfery o niższej temperaturze. Wskazano cztery potencjalne pasma, w których zakładane skrajne wartości długości fal są ustalane przez



RYS. 4. Normalizowane modele spektralne emisji termicznej IR Ziemi przedstawiono dla pięciu warunków chmur. Każde widmo obliczono zgodnie z opisem w tekście, dla obecnej struktury temperatury w średnich szerokościach geograficznych zależnej od wysokości i profili współczynników mieszania gazów, oraz przy kącie zenitalnym 60° , aby dokładnie symulować integrację całej Ziemi. Częstotliwość (w liczbach faliowych, cm^{-1}) jest podana na dole, a długość fali (w mm, 10^{-6} m) jest zaznaczona na górze. Każde widmo jest znormalizowane do widma ciała doskonale czarnego (BB) w temperaturze 288 K. Dogodnym sposobem interpretacji tych widm jest zwrócenie uwagi, że dla każdej długości fali emitowany strumień jest strumieniem ciała doskonale czarnego o temperaturze odpowiadającej temperaturze atmosferycznej na wysokości, na której głębokość optyczna wynosi jedność, gdzie głębokość optyczna jest obliczana wzdłuż ścieżki od górnej granicy atmosfery w dół. Na przykład w zakresie 20–100 mm pasmo rotacyjne wody jest tak silne, że widzimy tylko promieniowanie ze stosunkowo zimnej górnej troposfery, a nie z gorącej powierzchni lub dolnej troposfery. Górna krzywa przedstawia atmosferę bezchmurną, z cechami spektralnymi wyjaśnionymi na kolejnych rysunkach. Pozostałe krzywe przedstawiają warunki całkowitego zachmurzenia z chmurami na niskich, średnich i wysokich wysokościach, a także krzywą dla nominalnie realistycznej mieszanki tych czterech przypadków. Średnie ważone widma mają następujące wysokości chmur i frakcje pokrycia: chmury niskie, 1 km, 20%; chmury średnie, 6 km, 30%; i chmury wysokie, 12 km, 10%. W widmie IR głównym skutkiem dodania chmur jest zmniejszenie emitowanego strumienia ciągłego i zmniejszenie (a potencjalnie odwrócenie) względnej głębokości cech spektralnych.

rozdzielczości przestrzennej instrumentów przy długich długościach fal oraz słabością emitowanego strumienia przy krótkich długościach fal. Najlepszymi cechami mogą być pasma rotacyjne 17–50 mm, które dostarczają informacji o wodzie w stratosferze, a także w troposferze. Region 6–7 mm może być drugim wyborem, ponieważ CH_4 i N_2O mogą nakładać się na ten region.

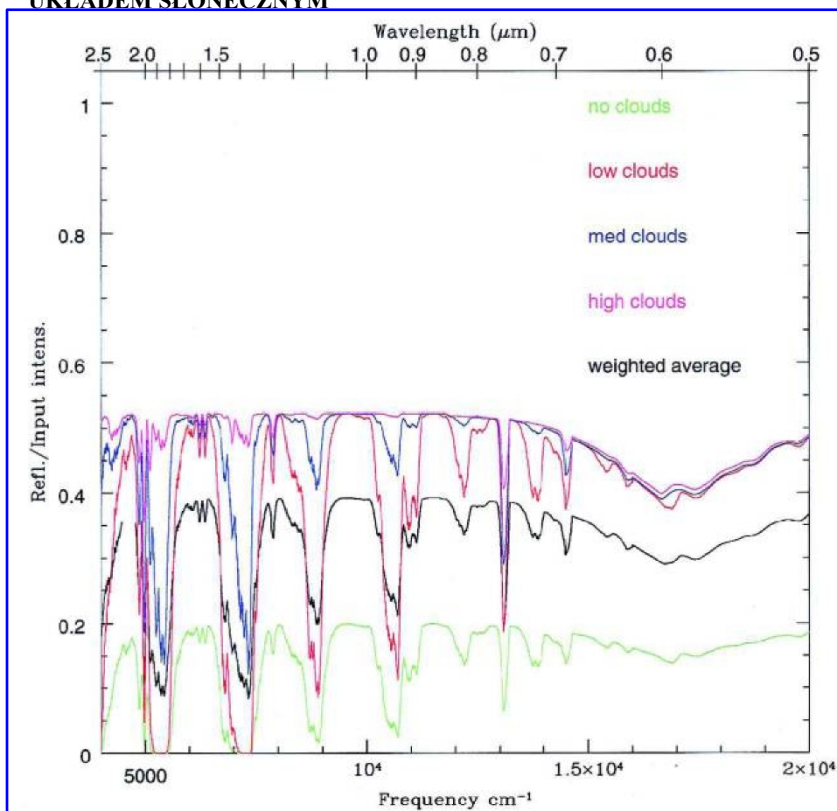
Widmo widzialne H_2O pokazano na rys.

7. Widmo pokazuje pasma o stosunkowo równych odstępach, które są bardzo silne przy długich długościach fal i słabsze przy krótkich długościach fal. W samym przedziale 0,5–1,0 mm znajduje się pięć znaczących cech H_2O o różnym zakresie siły pasma. Chociaż

H_2O ma tendencję do dominowania w widmie widzialnym, ale dzieje się to w dyskretnych pasmach, które przypadkowo skupiają się na długościach fal, przy których większość innych gatunków jest nadal dostępna. Na planecie podobnej do Ziemi cechy H_2O w obszarach 0,7, 0,8 i 0,9 mm są dobrymi kandydatami do wykrycia. Silne pasma o dłuższych długościach fal w obszarach 1,1, 1,4 i 1,9 mm są doskonałymi kandydatami, jeśli obszar ten byłby dostępny instrumentalnie.

Dwutlenek węgla (rys. 8 i 9)

CO_2 ma PAL wynoszący 355 ppm, równomiernie wymieszany. Widmo IR (rys. 8) pokazuje zarówno cel

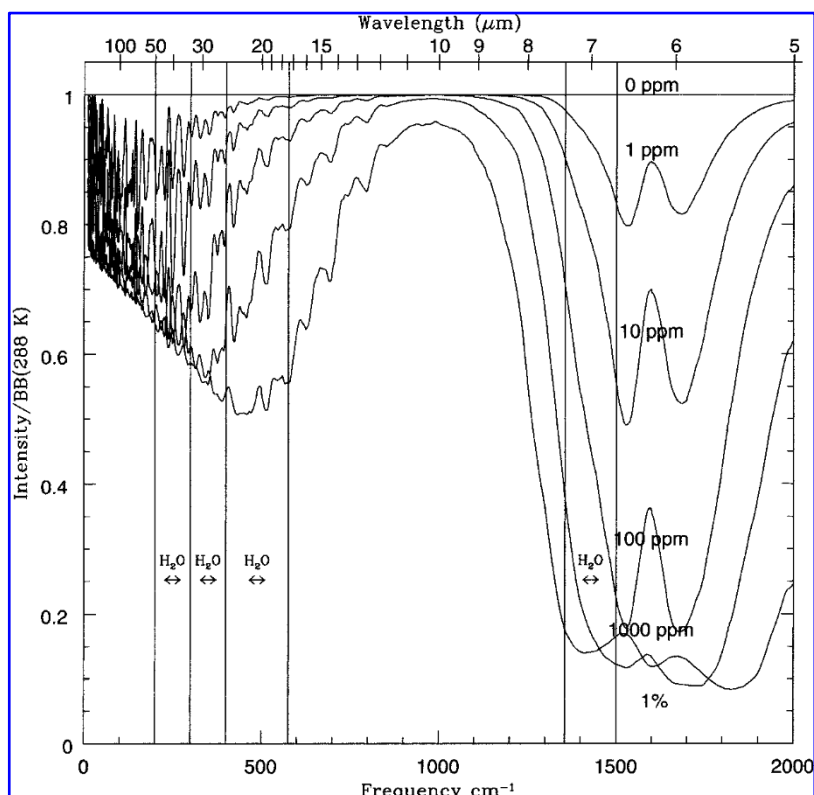


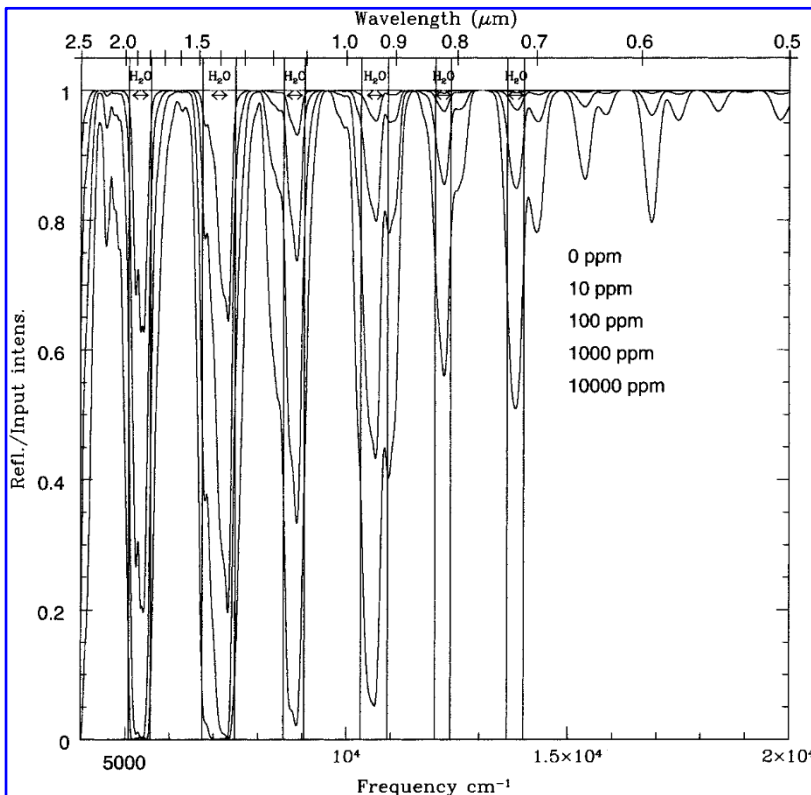
RYS. 5. Znormalizowane modele widmowe odbicia widzialnego Ziemi dla tych samych warunków atmosferycznych i chmur, co na rys. 4. Przypadek czystej atmosfery na dolnej krzywej ma najniższy poziom ciążkości ze względu na fakt, że odbicie powierzchniowe jest niskie w porównaniu z chmurami, a odwrotnie, przypadki zachmurzenia mają wysokie strumienie ciążkości. Średnia ważona jest liniową kombinacją skrajnych przypadków i została obliczona dla całkowitego albedo wynoszącego 0,39%, które jest wyższe od ostatnio dostępnej wartości 0,297% (Goode *et al.*, 2001). Średnie ważne widma mają następujące wysokości chmur i frakcje pokrycia: chmury niskie, 1 km, 20%; chmury średnie, 6 km, 30%; i chmury wysokie, 12 km, 10%. W widmie odbitym głównym skutkiem dodania chmur jest zwiększenie strumienia ciągłego odbicia i zmniejszenie względnej głębokości cech absorpcyjnych.

widma dla H_2O stanowi niezwykle praktyczny, ponieważ H_2O może

m składnikiem widma. Główne pasmo kowane na 15 mm i jest tak silne, że jest wszystkich pokazanych współczynników mieszania. Centralne odwrócenie w paśmie 15 mm przy wysokim

RYS. 6. Przedstawiono widmo emisji cieplnej wody dla sześciu poziomów wilgotności, od całkowicie suchej do zasadniczo nasyconej. W każdym przypadku zastosowano profil pionowego współczynnika mieszania pary wodnej na Ziemi, ale przeskalowany tak, aby uzyskać wskazane współczynniki mieszania na powierzchni. Dominującymi cechami są pasma rotacyjne 15–100 mm i pasma wibracyjne 6 mm. Tutaj i na kolejnych rysunkach wskazano potencjalne szerokie zakresy długości fal wykrywania, wybrane ze względu na prawdopodobieństwo uzyskania stosunkowo czystego wykrycia każdego gatunku dla pozasłonecznej planety ziemskiej. BB, ciało doskonale czarne.



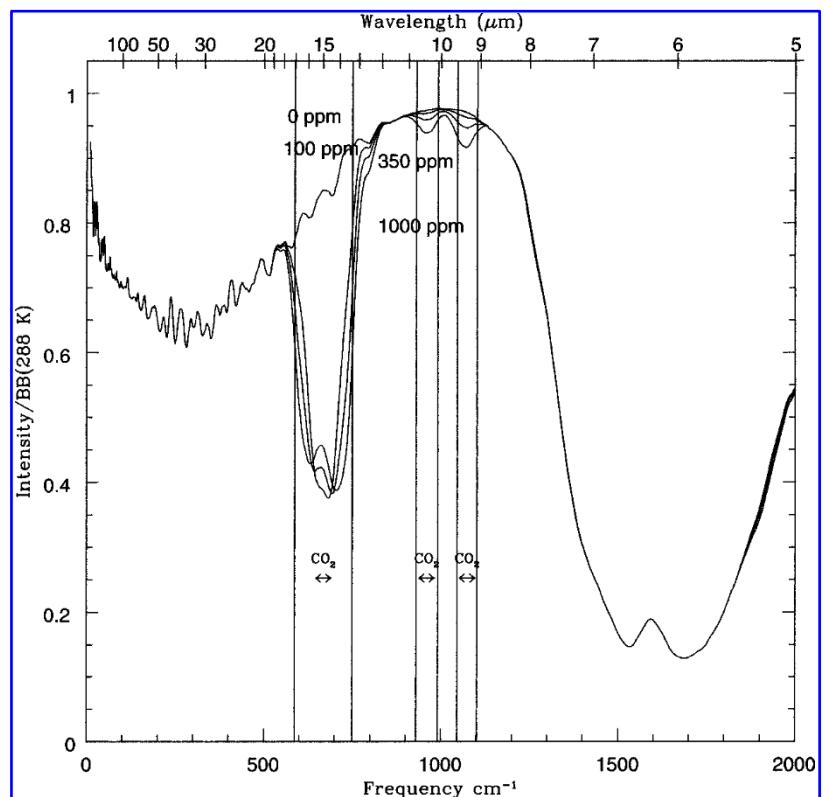


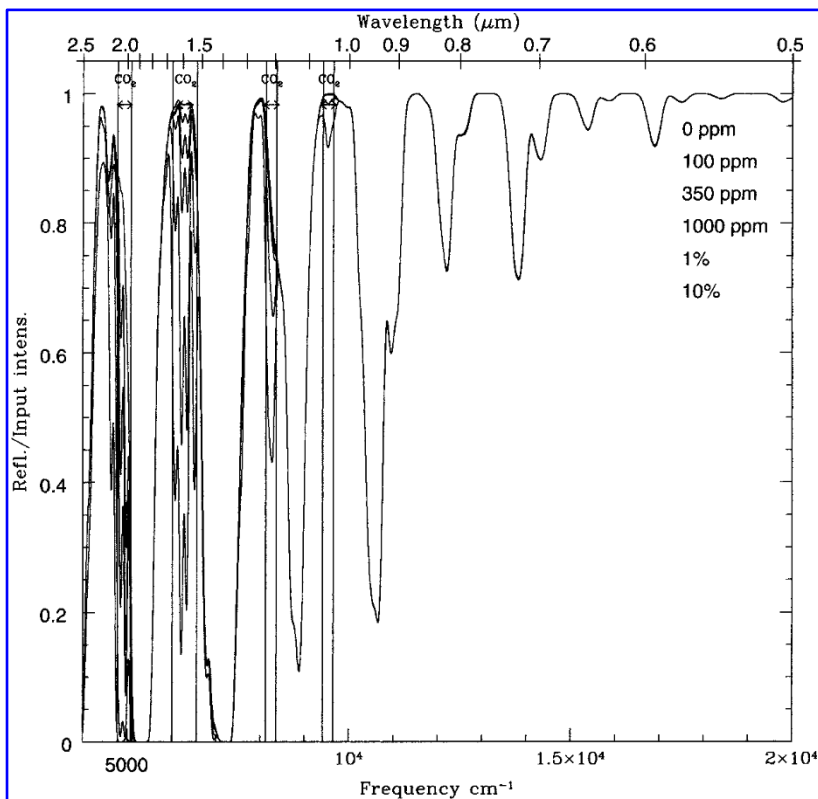
RYŚ. 7. Widmo odbicia wody przedstawiono dla pięciu poziomów wilgotności, podobnie jak na rys. 6. Dominujące cechy występują przy 0,7, 0,8 i 0,9 mm w zakresie widzialnym oraz 1,1, 1,4 i 1,9 mm w zakresie bliskiej podczerwieni.

obfitość jest spowodowana inwersją temperatury w stratosferze ziemskiej (która z kolei jest spowodowana absorpcją promieniowania UV przez O_2 i O_3 oraz przekształceniem go w ciepło). Słabsze pasma pojawiają się przy

9–11 mm, gdy zawartość CO_2 wzrasta do 1%. Możliwe jest dokonanie pomiarów jeszcze większej zawartości CO_2 , 10%, które będą sięgać dalej w okno 8–13 mm.

RYŚ. 8. Przedstawiono widmo emisji cieplnej dwutlenku węgla dla czterech poziomów obfitości. Zakłada się, że jednocześnie występuje nominalny poziom pary wodnej. Widmo dominuje charakterystyka CO_2 o długości fali 15 mm, ale przy wysokich poziomach obfitości zaczynają pojawiać się również słabe pasma o długości fali 9 i 10 mm. Należy zwrócić uwagę na inwersję w rdzeniu pasma 15 mm przy wysokich stężeniach, spowodowaną zwiększoną nieprzezroczystością w cieplej warstwie stratosferycznej. BB, ciało doskonale czarne.





RYŚ. 9. Przedstawiono widmo odbicia dwutlenku węgla dla sześciu poziomów obfitości. Podobnie jak na rys. 8 i 10, uwzględniono również obfitość pary wodnej w tle. Przy wysokich poziomach obfitości CO₂ można wykryć w paśmie 1,06 i Pasma 1,3 mm, ale aby zobaczyć mniejsze skupiska, potrzebne byłyby pasma 1,6 i 2,0 mm.

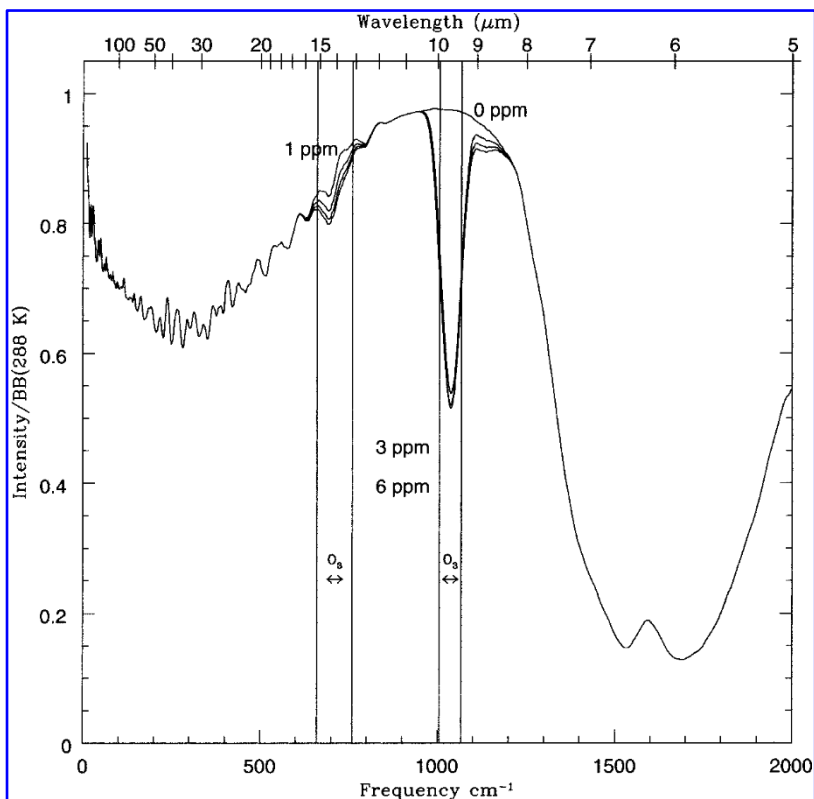
Cechy CO₂ widoczne w zakresie długości fal widzialnych przedstawiono na rys. 9, nałożone na tło absorpcji H₂O dla obecnej średniej zawartości wody na Ziemi. Najkrótsza długość fali CO₂ wynosi 1,06 mm i staje się znacząca tylko wtedy, gdy zawartość jest bardzo wysoka, rzędu 10%, co mogło mieć miejsce w przypadku atmosfery wczesnej Ziemi. Kolejne najkrótsze pasmo długości fali znajduje się przy 1,2 mm, w skrzydle pasma H₂O, ale mimo to jest nadal zauważalne przy zawartości 1%, co również wskazuje na wczesną Ziemię. Kolejne dostępne pasmo CO₂ znajduje się przy 1,6 mm, pomiędzy pasmami H₂O. W tym przypadku siła jest znacząca dla stężenia CO₂ tylko około trzy razy większego niż obecnie na Ziemi. Tak więc, jeśli dostępny jest pełny zakres od 1,0 do 1,7 mm, widmo to zapewnia oszacowania w szerokim zakresie stężeń CO₂.

Ozon (rys. 10–12)

O₃ ma PAL wynoszący 6 ppm w stratosferycznej „warstwie O₃” na wysokości około 25–35 km, z mniejszą ilością rozciągającą się w dół do powierzchni. W podezwierciu (rys. 10) główna cecha występuje przy 9 mm, a słabsze pasmo przy 14 mm. Jednakże, jeśli CO₂ jest obecny nawet w niewielkich ilościach, cecha 14 mm będzie w większości zablokowana. Pasma 9 mm jest wysoce

nasycony i zasadniczo nie zmienia się, gdy zawartość O₃ waha się od 1 do 6 ppm. To sprawia, że pasmo 9 mm jest słabym wskaźnikiem ilościowym O₃, ale znacznie ważniejsze jest to, że jest ono bardzo czułym wskaźnikiem obecności nawet śladowych ilości O₂. Minerale krzemianowe i O₃ mają silne cechy w zakresie 9 mm, ale istnieje niewielkie prawdopodobieństwo, że można je pomylić, ponieważ ich kształty spektralne są dość wyraźne. Najbliższym odpowiednikiem cechy krzemianowej w stosunku do O₃ jest minerał illit, ale nawet w tym przypadku kształty pasm można łatwo odróżnić od kształtu O₃.

Widzialna długość fali O₃ ma szeroki zakres od 0,5 do 0,10 mm, tzw. pasma Chap-puis, pokazane na rys. 11. (Słabe pasmo H₂O znajduje się w środku tego szerokiego zakresu O₃), zniekształcając jego nominalny trójkątny kształt). Poziomy obfitości wskazane na rys. 11 reprezentują warstwę stratosferyczną O₃, chociaż obfitość troposferyczna ma niewielki wpływ na obserwowane pasmo. Do analizy ilościowej pasma Chappuis mogą być korzystne, ponieważ ich głębokość absorpcji wzrasta w przybliżeniu liniowo wraz z obfitością, a w szczególności nie są one nasycone przy obecnym poziomie obfitości. Szerokość pasm Chappuis jest jednocześnie zaletą, ponieważ wymagana jest tylko niska rozdzielczość.

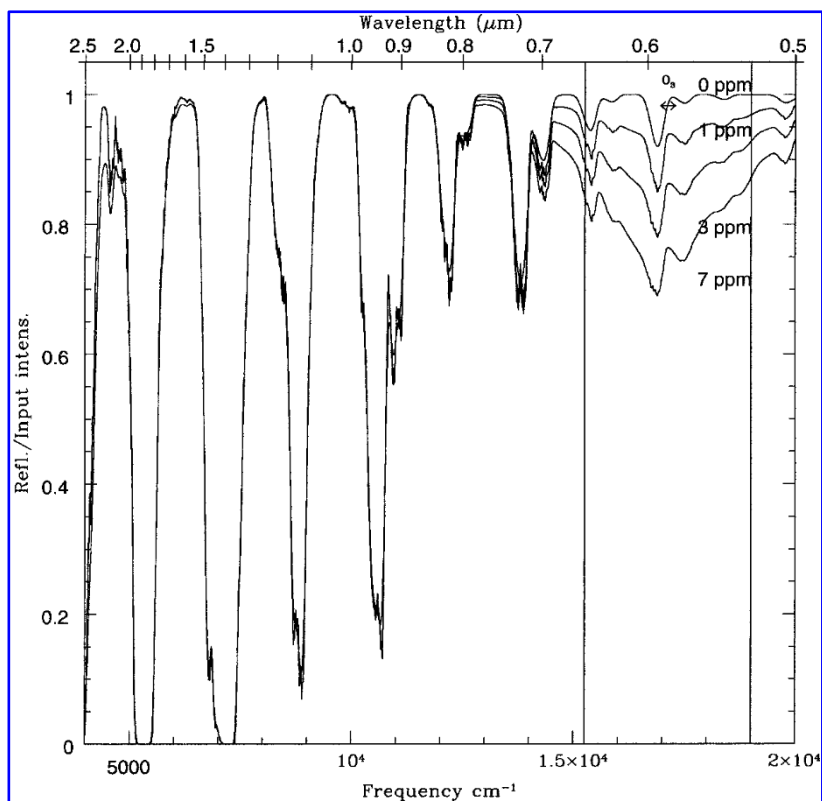


RYS. 10. Widmo emisji termicznej ozonu przedstawiono dla czterech poziomów obfitości, gdzie profil współczynnika mieszania obecnej Ziemi, zdominowany przez warstwę ozonu stratosferycznego, został przeskalowany, a wskazana wartość odpowiada wartości szczytowej warstwy ozonowej. Cechą charakterystyczną dla 9 mm jest nasycenie dla wszystkich wskazanych poziomów obfitości, a jedynie cecha charakterystyczna dla 14 mm, która byłaby ukryta przez obecność CO₂, znajduje się na liniowej części krzywej wzrostu. BB, ciało doskonale czarne.

wykrywać je, a także wadą, ponieważ zazwyczaj trudniej jest rozróżnić szerokie cechy niż wąskie na potencjalnie złożonym lub nieznanym tle widma.

Absorpcja promieniowania UV przez O₃ jest bardzo silna w tak zwanych pasmach Hugginsa (rys. 12), które zaczynają absorbować przy 0,34 mm i gwałtownie wzrastają w kierunku 0,31 mm i krótszych długościach fal. Na

RYS. 11. Widmo odbicia widzialnego ozonu przedstawiono dla czterech poziomów obfitości, dla warunków podanych w legendzie do rys. 10. Intensywność szerokiego pasma 0,6 mm reaguje liniowo na zmiany współczynnika mieszania.



PAL pasma te są nieprzezroczyste od 0,32 mm w kierunku krótszych fal i będą obecne nawet przy bardzo małych ilościach O_3 . Chociaż praca w zakresie UV wiąże się prawdopodobnie z większymi trudnościami eksperymentalnymi niż w przypadku dłuższych fal, ekstremalna czułość pasm Hugginsa sprawia, że obszar ten jest oczywistym potencjalnym celem poszukiwań biosygnali.

Metan (rys. 13 i 14)

CH_4 ma PAL wynoszący 1,6 ppm, jest równomiernie wymieszany w troposferze i zmniejsza się w stratosferze. W zakresie średniej podczerwieni (rys. 13) główna cecha CH_4 występuje przy długości fali 7 mm, gdzie nakłada się na pasmo 6 mm wody i sąsiednie pasma $N_2 O$ (oba znajdują się w widmie tła na rys. 13). Cechy CH_4 powodują jednak słabe pochłanianie nawet przy PAL; jednakże połączony efekt opadającej krzywej Plancka i dodatkowej nieprzezroczystości spowodowanej przez wodę sprawia, że obserwacja ta jest możliwa, ale trudna. Jednak w swojej historii atmosfera ziemską prawdopodobnie doświadczyła dwóch rodzajów stanów wysokiego stężenia CH_4 : po pierwsze, w pierwszej połowie swojego istnienia, kiedy jej skład był bardziej redukujący niż obecnie, a po drugie, w późniejszych warunkach „wybuchu CH_4 ”, kiedy to przez ograniczony czas mogło występować stężenie mieszanki wynoszące 1% (Bains *et al.*, 1999;

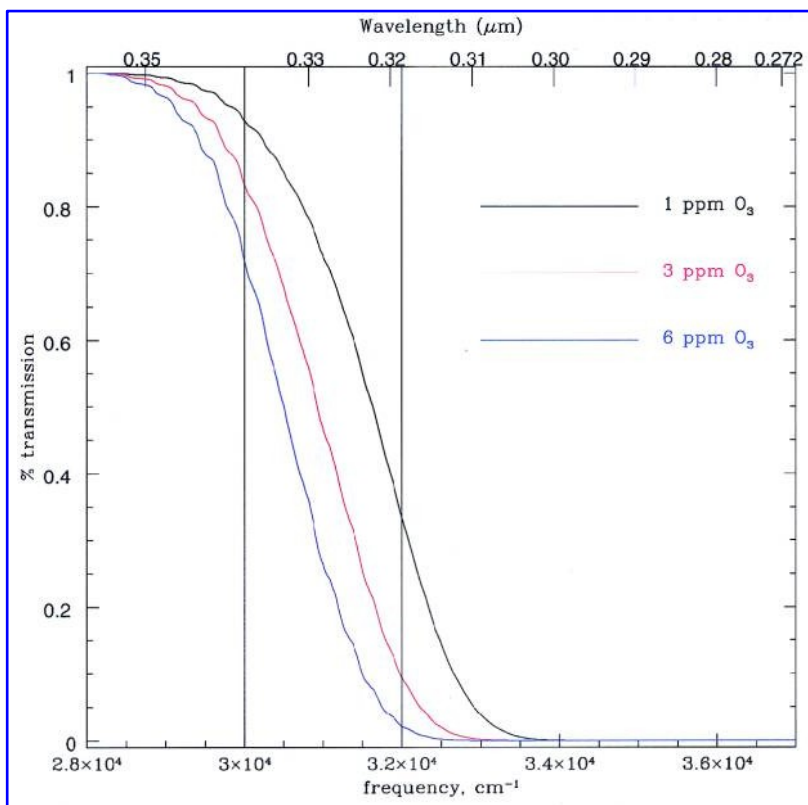
Hesselbo *i in.*, 2000). W obu przypadkach pasmo CH_4 jest wystarczająco silne, aby można je było dostrzec w skrzydle pasma pary wodnej przy 8–9 mm; dlatego też wykrycie może być możliwe.

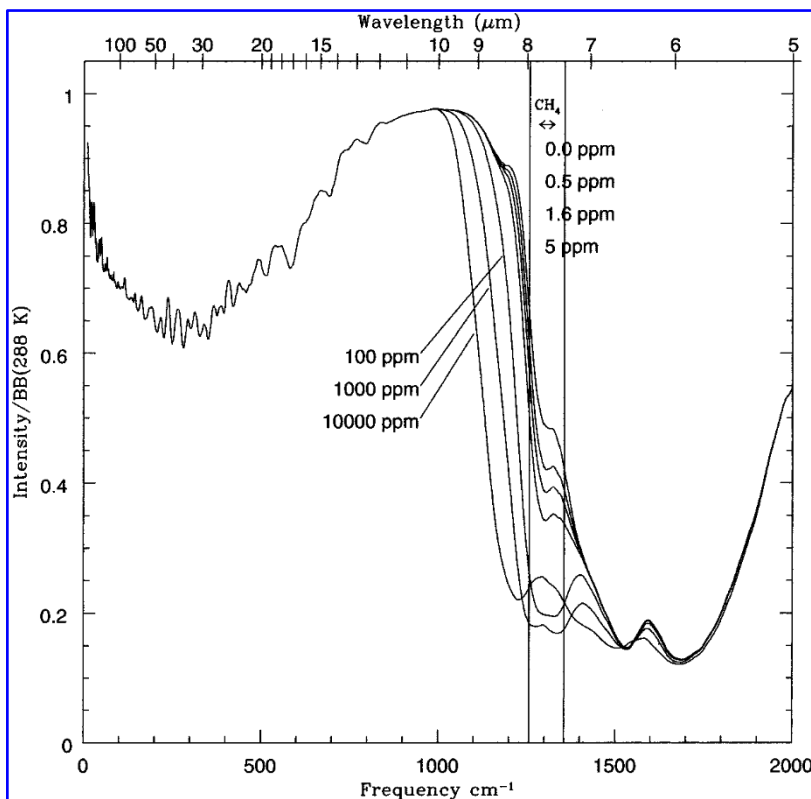
W zakresie widzialnym do bliskiej podczerwieni CH_4 (rys. 14) ma pięć stosunkowo niezasłoniętych cech absorpcyjnych między 0,6 a 1,0 mm i dwie kolejne przy długościach fal 1,7 i 2,4 mm. Cechy przy 0,6, 0,7, 0,8, 0,9 i 1,0 mm mają znaczną głębokość dla wysokich stężeń, w zakresie od 1000 ppm do 1%, który jest bardzo interesujący dla wczesnej Ziemi. Cechy charakterystyczne dla 1,7 i 2,4 mm stają się istotne przy poziomach CH_4 wynoszących 100 ppm. Zatem żadna z widocznych cech nie jest przydatna przy obecnych poziomach występowania, ale mogą one być bardzo istotne dla 100-krotności PAL.

Podtlenek azotu (rys. 15)

$N_2 O$ powstaje podczas mikrobiologicznych reakcji utleniania i redukcji, a źródła niebiologiczne są najwyraźniej nieistotne. Jest to zatem potencjalny biosygnat. Ma PAL wynoszący 310 ppb, jest równomiernie wymieszany w troposferze, ale znika w stratosferze. W średniej podczerwieni (rys. 15) $N_2 O$ ma pasmo w pobliżu 8 mm, mniej więcej porównywalne pod względem siły z sąsiednim pasmem CH_4 , ale słabe w porównaniu z nakładającym się pasmem $H_2 O$. Widmo tła na rys. 15 obejmuje zarówno

RYŚ. 12. Przedstawiono widmo odbicia promieniowania UV przez ozon dla trzech poziomów jego stężenia w warstwie ozonowej stratosfery, zgodnie z opisem w legendach do rysunków 10 i 11. Wskazano pasmo długości fal, w którym intensywność jest w przybliżeniu liniowa, około 0,33 mm. Rdzeń pasma ozonu znajduje się przy jeszcze krótszej długości fali i jest całkowicie nasycony, ale mógłby być wykorzystany do wykrywania ozonu przy znacznie niższych stężeniach, gdyby nie występowały żadne inne cechy absorpcyjne.





RYŚ. 13. Przedstawiono widmo emisji termicznej metanu dla siedmiu stężeń mieszania. Pasmo 7 mm byłoby wyraźniejsze, gdyby nie obecność wody w tle, która w tym przypadku stanowi poważny potencjalny czynnik zakłócający widmo. Obecne poziomy metanu na Ziemi powodują jedynie słabe zabarwienie po stronie dominującego pasma wody, ale wysokie poziomy metanu, takie jak te, które mogły występować we wczesnej atmosferze ziemskiej, mogłyby powodować silniejsze, łatwiej wykrywalne zabarwienie. BB, ciało doskonale czarne.

H_2O i CH_4 . Na szczęście wzorce absorpcji tych trzech gatunków są różne, więc w zasadzie można je rozdzielić. Cechy spektralne N_2O będą coraz bardziej widoczne w atmosferach zawierających mniej pary H_2O . Dodatkowe pasmo przy 17 mm może być całkowicie zasłonięte przez CO_2 , dlatego nie należy oczekiwać, że będzie ono użyteczne. W zakresie widzialnym nie ma żadnych znaczących cech N_2O . Stężenia N_2O w atmosferze będą spadać wraz ze spadkiem stężeń O_2 , jeśli siła źródła biologicznego pozostanie stała (Kasting i Donahue, 1980).

Tlen (rys. 16)

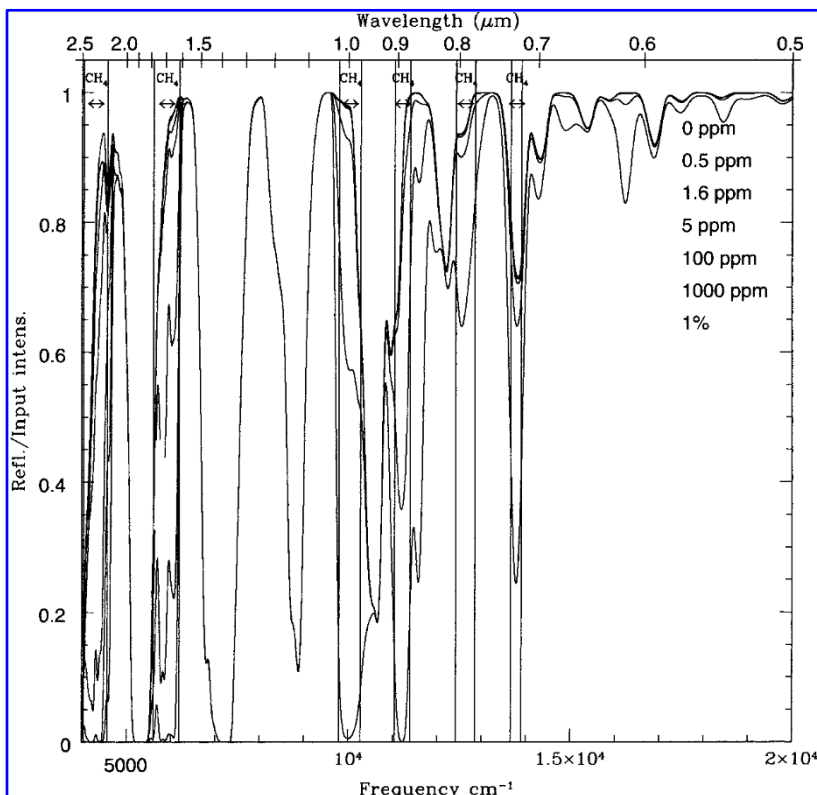
Tlen ma PAL wynoszący 21% i jest równomiernie wymieszany. W zakresie widzialnym (rys. 16) występują trzy potencjalnie istotne cechy: przy 0,69 (pasmo Fraunhofera B), 0,76 (pasmo Fraunhofera A) i 1,26 mm. Spośród nich najsilniejsze jest pasmo 0,76 mm, które ma znaczną głębokość przy poziomie obfitości wynoszącym 1%, co sprawia, że może być bardzo przydatne jako biosygnatura. Wszystkie trzy pasma są zasadniczo niezasłonięte w obecnym spektrum Ziemi.

W podczerwieni nie ma znaczących cech O_2 . W zakresie submilimetrycznym występują silne linie O_2 , jednak długości tych fal są znacznie większe niż rozważane tutaj.

Podsumowanie: listy pasm i krzywe wzrostu (tabela 1 i 2)

Omówione powyżej pasma spektralne wymieniono w tabeli 1, zaczynając od pasm podczerwieni w zakresie 7–50 mm (w tym dwóch okien ciągłych, które są przydatne do pomiaru temperatury). Następnie wymieniono pasma widzialne między 0,3 a 2,5 mm (z których większość mieści się w zakresie 0,3–1,1 mm). W kolumnach tabeli podano nazwę gatunku, liczby fali pasm (minimalną, maksymalną i średnią), rozdzielczość spektralną [średnia/(maksymalna 2 minimalna)] oraz odpowiadające im wartości długości fal. Wpisy dotyczące liczb fali zostały określone graficznie na podstawie wizualnej analizy wykresów i są zatem funkcją zarówno samego gatunku, jak i wszelkich zakłóceń spowodowanych przez sąsiednie cechy spektralne. Wartości intensywności pełnej szerokości w połowie maksymalnej wartości (FWHM), a także rozdzielczości spektralne mają reprezentować w przybliżeniu optymalne szerokości pasma wykrywania, w sensie dopasowanego filtra, w oparciu o założenie, że widma będą określone wyłącznie przez rozpatrywane tutaj gatunki. Dlatego też, jeśli przewiduje się znaczące różnice w widmach, może być konieczne zastosowanie wyższych rozdzielczości spektralnych, aby umożliwić jednoznaczną identyfikację cech.

Średnia głębokość absorpcji molekularnej wynosi

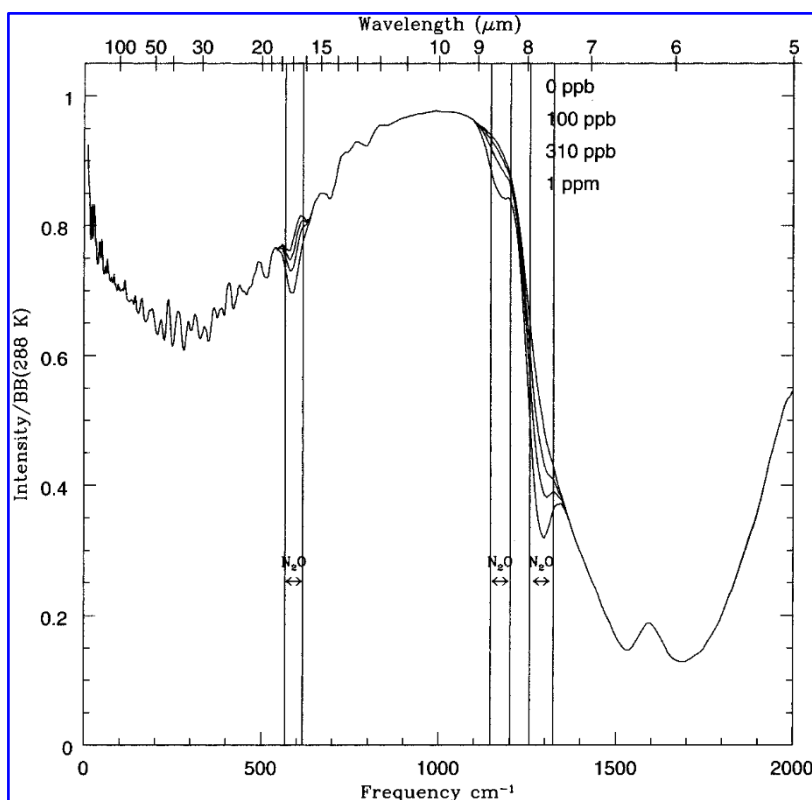


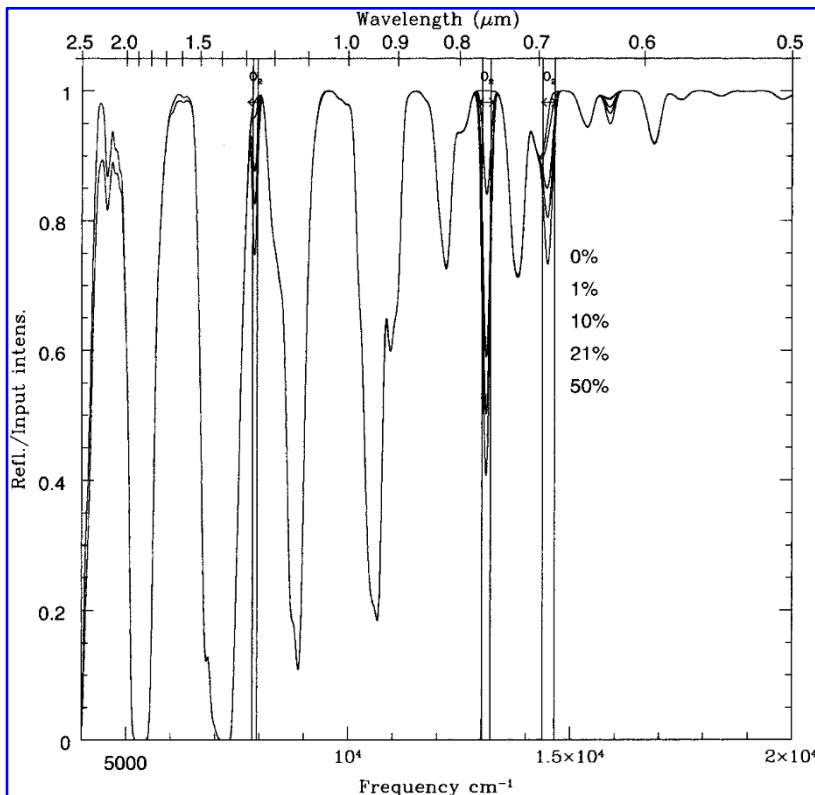
RYS. 14. Widmo odbicia widzialnego metanu przedstawiono dla siedmiu poziomów obfitości. Przy niskiej obfitości metan byłby wykrywalny tylko przy najdłuższej długości fali, około 2,4 mm. Jednak przy umiarkowanej i wysokiej obfitości metan można wykryć w pasmach 0,7, 0,8, 0,9 i 1,0 mm.

wymienione w tabeli 2, jako funkcja współczynnika mieszania, dla obecnej Ziemi (tj. obecnego ciśnienia bazowego i profilu temperatury) na podstawie analizy krzywej wzrostu (Goody i Yung, 1989). Każda głębokość jest

obliczona na podstawie poziomów kontinuum wskazanych na rysunkach, tj. dla H_2O głębokość jest mierzona od płaskiego, pozbawionego cech charakterystycznych kontinuum, a dla wszystkich innych gatunków głębokość jest mierzona w odniesieniu do

RYS. 15. Przedstawiono widmo emisji termicznej podtlenku azotu dla czterech poziomów obfitości. Podobnie jak w przypadku metanu, podtlenek azotu staje się wykrywalny w zakresie 8 mm tylko przy wysokiej obfitości i będzie częściowo mieszał się z metanem, a także z dominującą cechą wody. (Nie ma odpowiedniej widzialnej cechy długości fali podtlenku azotu). BB, ciało doskonale czarne.





RYŚ. 16. Widmo odbicia widzialnego tlenu cząsteczkowego przedstawiono dla pięciu poziomów obfitości. Pasma wykrywania to pasma 0,7 i 0,76 mm, które są stosunkowo wąskie spektralnie, ale mają w przybliżeniu liniową reakcję na obfitość tlenu. Przy 0,76 mm nie ma znanych cech zakłócających. (Nie ma odpowiedniej cechy dla tlenu w zakresie długości fal średniej podczerwieni).

do nominalnego kontinuum wody wskazanego na rysunkach. Wartości głębokości zawierają zatem element realizmu w kontekście wykrywania planet (przynajmniej w odniesieniu do obecności wody), który nie byłby obecny, gdyby wszystkie obliczenia zostały wykonane w odniesieniu do pozbawionego cech charakterystycznych tła. Dla każdego pasma spektralnego integracja jest wykonywana pomiędzy nominalnymi granicami FWHM narysowanymi na każdym rysunku i wymienionymi w tabeli 1. W ten sposób obszar absorpcji można również zapisać jako iloczyn FWHM i głębokości. Na przykład średnia głębokość pasma O_2 Fraunhofera A przy $13\,105\,cm^{-1}$ wynosi 0,47 w PAL i w atmosferze bezchmurnej.

Tabele te mogą być wykorzystane do stworzenia modelu widma dla rozdzielczości spektralnych równych lub niższych od przyjętych tutaj, a zatem służą jako użyteczna baza danych symulacyjnych dla różnych konfiguracji TPF/Darwin.

CECHY SPEKTRALNE POWIERZCHNI PLANETY

Widmo planety powinno zmieniać się w zależności od pór roku, pogody i różnych typów powierzchni pojawiających się i znikających z pola widzenia. W skali czasowej dłuższej niż okres obrotu lub typowy

zmiany pogody, efekty te powinny się wyrównać i nie powinny stanowić poważnych komplikacji w wykrywaniu sygnałów spektralnych biosygnałów atmosferycznych. Jednak obserwowanie zmian w czasie może przynieść potencjalne korzyści. Na przykład może być możliwe określenie okresu obrotu planety, występowania zjawisk pogodowych (zmieniające się w czasie chmury wodne wskazują na obecność oceanów wodnych), biosygnałów powierzchniowych, obecności oceanów wodnych, a może nawet udziału oceanów lub lodu. Można by oczekiwać, że różne albedo i temperatury powierzchni różnych części nierozdzielonej planety podobnej do Ziemi będą się wzajemnie znosić. W rzeczywistości tak się nie dzieje, głównie z powodu nierównomiernego oświetlenia i kąta widzenia, a w rzeczywistości stosunkowo niewielka część widocznej półkuli dominuje w całkowitym strumieniu energii z planety nierozdzielonej przestrzennie. Z tego powodu istnieje możliwość wykrycia cech powierzchni na podstawie danych TPF/Darwin.

Zmiany strumienia w zakresie długości fal optycznych, które występują w skali czasowej obrotu i są spowodowane przez różne rodzaje powierzchni pojawiających się i znikających z pola widzenia (np. oceany, w tym odbicia lustrzane, ląd i pokrywa lodowa), mogą wynosić nawet 150–200% dla Ziemi bezchmurnej. Zmiany strumienia mogą wynosić nawet 650% dla planety pokrytej lodem z bezludowymi oceanami w stanie ciekłym. Liczby te są ponownie

TABELA 1. GATUNKI MOLEKULARNE I PASMA SPEKTRALNE WYKORZYSTANE W NINIEJSZYM BADANIU

Pasma	Gatunek	$S \text{ (cm}^{21}\text{)}$			Rozdzielczość	$I \text{ (mm)}$		
		Minimum	Maksymalna	Średnia		Minimum	Maksymalna	Średnia
1	H ₂ O	200	300	250	2	33,33	50	40
2	H ₂ O	300	400	350	4	25	33,33	28,57
3	H ₂ O	400	576	488	3	17,36	25	20,49
4	H ₂ O	1356	1500	1428	10	6,67	7,37	7,00
5	CO ₂	587	750	668	4	13,33	17,04	14,96
6	CO ₂	930	990	960	16	10,75	10,10	10,42
7	CO ₂	1046	1102	1074	19	9,56	9,07	9,31
8	O ₃	1005	1067	1036	17	9,37	9,95	9,65
9	CH ₄	1257	1356	1306	13	7,37	7,96	7,65
10	CH ₄	1150	1356	1253	6	7,37	8,70	7,98
11	Kont.	804	986	895	5	10,14	12,44	11,17
12	Kont.	1082	1226	1154	8	8,16	9,24	8,67
13	H ₂ O	5080	5580	5330	11	1,79	1,97	1,88
14	H ₂ O	6740	7480	7110	10	1,34	1,48	1,41
15	H ₂ O	8580	9 050	8815	19	1,10	1,17	1,13
16	H ₂ O	10 320	10 930	10 625	17	0,91	0,97	0,94
17	H ₂ O	12 000	12 350	12 175	35	0,81	0,83	0,82
18	H ₂ O	13 630	14 000	13 815	37	0,71	0,73	0,72
19	CO ₂	4780	5080	4930	16	1,97	2,09	2,03
20	CO ₂	6020	6570	6295	11	1,52	1,66	1,59
21	CO ₂	8120	8360	8240	34	1,20	1,23	1,21
22	CO ₂	9410	9650	9530	40	1,04	1,06	1,05
23	O ₂	7840	7 950	7895	72	1,26	1,28	1,27
24	O ₂	13 010	13 200	13 105	69	0,76	0,77	0,76
25	O ₂	14 380	14 650	14 515	54	0,68	0,70	0,69
26	O ₃	15 250	19 000	17 125	5	0,53	0,66	0,58
27	O ₃	30 000	32 000	31 000	16	0,31	0,33	0,32
28	CH ₄	4040	4570	4305	8	2,19	2,48	2,32
29	CH ₄	5610	6190	5 900	10	1,62	1,78	1,69
30	CH ₄	9790	10 280	10 035	20	0,97	1,02	1,00
31	CH ₄	11 040	11 390	11 215	32	0,88	0,91	0,89
32	CH ₄	12 420	12 850	12 635	29	0,78	0,81	0,79
33	CH ₄	13 660	13 900	13 780	57	0,72	0,73	0,73

Podano również dwa pasma ciągłe IR (11 i 12), w których w atmosferze wolnej od chmur można zaobserwować emisję z powierzchni. W kolumnach 3–5 podano nominalne optymalne wartości liczby falowej (minimalną, maksymalną i średnią) dla każdego pasma. W kolumnie 6 podano odpowiednią rozdzielczość spektralną. W kolumnach 7–9 podano te same informacje w odniesieniu do długości fali.

zmniejszona do 10–20% w przypadku pokrywy chmur podobnej do ziemskiej (Ford *et al.*, 2001). Ta zmienność jest bezpośrednią konsekwencją dużych różnic w albedo między oceanem, lądem i lodem (.10% dla oceanu, .30–40% dla lądu, .60% dla śniegu i niektórych rodzajów lodu). Rozróżnienie między tymi różnymi powierzchniami nie wymaga konkretnego sygnatury spektralnej, dlatego wymagany czas obserwacji może być krótszy niż w przypadku wykrywania cech spektralnych.

Możliwe jest wykrycie biosygnalów powierzchniowych, jeśli stanowią one znaczną część powierzchni planety (np. Schneider *et al.*, 2000). Interesującym przykładem z Ziemi jest sygnał „czerwonej krawędzi” pochodzący od roślin fotosyntetycznych przy 750 nm, gdzie współczynnik odbicia zmienia się niemal o rząd wielkości.

wielkości (Ford *i in.*, 2001). Jest to znacznie większa zmiana niż zmiana współczynnika odbicia po obu stronach zielonych długości fal (mniej niż dwukrotna) spowodowana absorpcją chlorofilu. Rośliny fotosyntetyzujące rozwinęły tę silną refleksję podczerwieni jako mechanizm chłodzący, aby zapobiec przegrzaniu, które z kolei spowodowałoby degradację chlorofilu. Prosta kalkulacja zintegrowanej różnicy odbicia między Ziemią bez roślinności a naszą Ziemią (zakładając, że jedna trzecia powierzchni Ziemi pokryta jest lądem, a jedna trzecia lądu pokryta jest roślinnością) daje wynik 2%. Biorąc pod uwagę geometrię, rozdzielczość czasową w skali czasowej obrotu i efekty rozpraszania kierunkowego, liczba ta powinna być znacznie większa, gdy w zasięgu wzroku znajduje się duży obszar leśny. Szczegółowe obliczenia

W TABELI 2. PODANO WARTOŚCI KRZYWEJ WZROSTU DLA KAŻDEGO PASMA MOLEKULARNEGO, NAJPIERW DLA OBSZAR EMISJI TERMICZNEJ W PODCZERWIENI ORAZ OBSZAR WIDZIALNY, BLISKIEJ PODCZERWIENI I ULTRAFIOLETU

Gazu						
Gaz, stężenie	Wartość krzywej wzrostu przy danej liczbie falowej					
H ₂ O	250 cm ²¹	350 cm ²¹	488 cm ²¹	1428 cm ²¹		
1 ppm	0,090	0,043	0,072	0,048		
10 ppm	0,213	0,124	0,025	0,161		
100 ppm	0,341	0,279	0,068	0,427		
1000 ppm	0,377	0,416	0,153	0,747		
10 000 ppm	0,339	0,436	0,226	0,850		
CO ₂	668 cm ²¹	960 cm ²¹	1074 cm ²¹			
100 ppm	0,470	0,029	0,037			
350 ppm	0,520	0,037	0,050			
1000 ppm	0,548	0,054	0,075			
10 000 ppm	0,549	0,153	0,207			
O ₃	1036 cm ²¹	710 cm ²¹				
1 ppm	0,382	0,141				
3 ppm	0,406	0,154				
6 ppm	0,405	0,162				
N ₂ O	592 cm ²¹	1174 cm ²¹	1290 cm ²¹			
100 ppb	0,014	0,008	0,050			
310 ppb	0,031	0,023	0,095			
1000 ppb	0,063	0,063	0,160			
CH ₄	1306 cm ²¹					
0,5 ppm	0,056					
1,6 ppm	0,091					
5,0 ppm	0,137					
100 ppm	0,300					
1000 ppm	0,330					
10 000 ppm	0,262					
Widzialne/bliskie podczerwieni/UV						
Gaz, stężenie	Wartość krzywej wzrostu przy danej liczbie falowej					
H ₂ O	5330 cm ²¹	7110 cm ²¹	8815 cm ²¹	10 625 cm ²¹	12 175 cm ²¹	13 815 cm ²¹
10 ppm	0,236	0,178	0,041	0,025	0,003	0,003
100 ppm	0,586	0,485	0,172	0,124	0,025	0,024
1000 ppm	0,901	0,830	0,500	0,401	0,118	0,130
10 000 ppm	0,990	0,988	0,885	0,795	0,379	0,441
CO ₂	4930 cm ²¹	6295 cm ²¹	8240 cm ²¹	9530 cm ²¹		
100 ppm	0,170	0,007	0,005	0,0002		
350 ppm	0,309	0,030	0,012	0,0006		
1000 ppm	0,443	0,065	0,027	0,001		
1	0,667	0,260	0,116	0,011		
10	0,714	0,566	0,331	0,062		
CH ₄	4305 cm ²¹	5900 cm ²¹	10 035 cm ²¹	11 215 cm ²¹	12 635 cm ²¹	13 780 cm ²¹
0,5 ppm	0,005	0,003	0,063	0,001	0,0009	0,002
1,6 ppm	0,009	0,012	0,011	0,002	0,0009	0,002
5,0 ppm	0,111	0,039	0,025	0,004	0,0009	0,003
100 ppm	0,462	0,298	0,039	0,060	0,010	0,010
1000 ppm	0,587	0,630	0,315	0,417	0,032	0,073
10 000 ppm	0,627	0,814	0,881	0,818	0,267	0,455
O ₂	7895 cm ²¹	13 105 cm ²¹	14 515 cm ²¹			
1	0,023	0,150	0,025			
10	0,104	0,388	0,088			
21	0,153	0,474	0,124			
50	0,230	0,565	0,181			
O ₃	17 125 cm ²¹	31 000 cm ²¹				
1 ppm	0,048	0,305				
3 ppm	0,112	0,531				
7 ppm	0,195	0,692				

Dla każdego gatunku i poziomu liczebności podano średnią głębokość każdej ważnej cechy spektralnej, a centralną liczbę falową odpowiedniego pasma zaznaczono u góry każdej kolumny. Pasma i odpowiadające im wartości długości fal podano w tabeli 1. Wpisy obejmują zarówno słabe linie (np. 0,029 lub średnia głębokość 2,9%), jak i silne linie (np. 0,474 lub średnia głębokość 47,4%). Podane wartości są odpowiednie dla struktury temperatury podobnej do ziemskiej i profilu stosunku mieszania dla każdego gatunku. W przypadku O₃ wartości stosunku mieszania odnoszą się do szczytowej liczebności w stratosferze.

Konieczne są dalsze badania. Zwracamy uwagę, że ten charakter roślinności został wykryty przez sondę Galileo z niewielkiej części Ziemi (Sagan *et al.*, 1993) i od tego czasu jest regularnie wykorzystywany przez satelity operacyjne zorientowane na Ziemię. Niektóre fotosyntetyczne organizmy morskie również mają sygnaturę zależną od długości fali, podobną do roślinności lądowej. Ponadto zakwity fitoplanktonu mogą powodować tymczasowe zmiany na dużych obszarach oceanu. Ocean jest jednak bardzo ciemny w zakresie optycznym i ma silne pasma absorpcji wody w podczerwieni, więc większość strumienia odbitego od Ziemi nie pochodzi z oceanu, mimo że stanowi on dużą część powierzchni. Oznacza to, że trudno będzie wykryć różnicę kolorów spowodowaną zmiennością przestrzenną lub czasową fotosyntetycznych organizmów morskich.

Niedawno Woolf *i in.* (2002) oraz Arnold *i in.* (2002) wstępnie wykryli czerwoną krawędź chlorofilu w zintegrowanym widmie Ziemi, uzyskanym poprzez obserwację światła słonecznego odbitego od Ziemi do ciemnej strony Księżyca i z powrotem do Ziemi, tzw. widma blasku Ziemi. Ta sama obserwacja podkreśla silne rozpraszanie Rayleigha w zakresie 0,3–0,5 mm, potencjalny sygnał charakteryzujący planetę, który wraz z cechą chlorofilu zasługuje na dalsze badania.

W przypadku planety o niezerowej nachyleniu osi obrotu można również wykryć sezonowe zmiany strumienia. Całkowita sezonowa zmiana globalnego albedo Ziemi jest mniejsza niż oczekiwana zmiana wynikająca z ruchu obrotowego [7% na podstawie symulacji blasku Ziemi przeprowadzonych przez Goode'a *i in.* (2001)], ale może być znacznie większa w przypadku planet o innym nachyleniu osi obrotu lub innym nachyleniu orbity. Zmiany rotacyjne w strumieniu promieniowania w średniej podczerwieni również mogą być wykrywalne, ale w przypadku Ziemi oczekuje się, że będą one mniejsze niż zmiany strumienia optycznego, ponieważ temperatura powierzchni nie zmienia się tak bardzo jak albedo powierzchni na całej Ziemi. W średniej podczerwieni zmiany sezonowe mogą być większe niż zmiany rotacyjne w średniej podczerwieni z powodu sezonowych zmian temperatury. Planety o jednolitej pokrywie chmur, takie jak Wenus, nie wykazywałyby zmian związanych z rotacją ani zmian sezonowych w strumieniu nierozdzielonym przestrzennie.

Podsumowanie

Architektura TPF/Darwin, która jest w stanie wykrywać cechy spektralne przy wysokim stosunku sygnału do szumu, będzie również w stanie wykrywać 10% zmiany strumienia. Możliwość wyprowadzenia właściwości fizycznych planety w skali czasowej rotacji lub pór roku

, stanowi ważne uzupełnienie głównego celu TPF/Darwin, jakim jest wykrywanie i charakteryzowanie planet podobnych do Ziemi. Istnieje duża przestrzeń parametrów możliwych właściwości fizycznych planet pozasłonecznych podobnych do Ziemi, dlatego zaleca się dokładniejsze badanie zmian w czasie i cech powierzchniowych.

WNIOSKI: ZAKRESY DŁUGOŚCI FAL I PRIORYTETY CECH SPEKTRALNYCH

Zakres długości fal

W niniejszym opracowaniu wykorzystujemy dane z zakresu podczerwieni i widzialnego pasma molekularnego w celu oceny minimalnego zakresu długości fal wymaganego od TPF/Darwin do scharakteryzowania planet ziemskich jako podobnych do Ziemi i potencjalnie zdolnych do podtrzymywania życia.

W podczerwieni termicznej absolutnie niezbędne jest obserwowanie pasma CO₂ o długości 15 mm oraz pasma O₃ o długości 9,6 mm. O₃ jest naszym najlepszym gazem biosygnalizacyjnym w zakresie średniej podczerwieni. Należy również obserwować cały obszar „okna” 8–12 mm, ponieważ daje on najlepszą możliwość oszacowania temperatury powierzchni planety. Konieczne jest zmierzenie H₂O, które można uzyskać albo z pasma 6,3 mm, albo z pasma rotacyjnego, które rozciąga się od 12 mm do zakresu mikrofalowego. Wreszcie pomocna byłaby obserwacja pasma 7,7 mm CH₄, ponieważ jest to potencjalnie dobry gaz biosygnalizacyjny dla planet typu wczesnej Ziemi. Zatem minimalny zakres długości fal wynosiłby 8,5–20 mm, a optymalny zakres powinien rozciągać się od 7 do 25 mm.

W zakresie widzialnym/bliskiej podczerwieni niezbędne jest obserwowanie pasmo 0,76 mm O₂. Szerokopasmowa absorpcja 0,45–0,75 mm O₃ będzie wymagała mniej więcej takiej samej wartości sygnału/szumu i na planecie pokrytej chmurami lub o mniejszej zawartości tlenu może być łatwiejsza do wykrycia. Potrzebne jest również co najmniej jedno silne pasmo H₂O — sugerujemy 0,94 mm, które można uzyskać, wychodząc do 1,0 mm. CO₂ jest znacznie trudniejsze do zaobserwowania w zakresie widzialnym/bliskiej podczerwieni. Jeśli planeta jest bogata w CO₂, najlepszym pasmem jest 1,06 mm, co wymagałoby pokrycia długości fali co najmniej do 1,1 mm. Nie powinno to jednak być głównym czynnikiem determinującym zakres długości fal, które mają być obserwowane, ponieważ pasmo to jest słabe, nawet w widmie Wenus. W przypadku gazów ziemskich najkrótsze pasma długości fal, które dobrze się prezentują, znajdują się przy 2,00 i 2,06 mm. Wreszcie, najlepsze pasmo CH₄ krótsze niż 1,0 mm znajduje się przy 0,88 mm,

choć występuje tylko w znacznie większej ilości niż na Ziemi. Wymagany zakres długości fal wynosiłby 0,7–1,0 mm, a preferowalibyśmy zakres od 0,5 mm (w celu wykrycia szerokopasmowej absorpcji przez O_3) do 1,1 mm (w celu wykrycia CO_2).

O_3 może być wykryty w zakresie UV (przy 0,34–0,31 mm); jednakże konieczne są dalsze badania w celu oceny potencjalnych zakłóceń. Na Ziemi tylko O_2 i NO_2 absorbują znacząco w regionie O_3 , ale na innych planetach mogą występować konkurencyjne źródła nieprzezroczystości.

Ustalenie priorytetów

Podjęcie decyzji, które cechy w każdym zakresie długości fal są najważniejsze do obserwacji, nie jest prostym zadaniem, a w środowisku spektroskopowym jako całości można spotkać się z dużą różnorodnością wyborów. Jednak obecna grupa autorów zgadza się co do następujących kwestii:

1. Wykrywanie O_2 lub jego fotolitycznego produktu O_3 jest naszym najwyższym priorytetem, ponieważ O_2 jest naszym najbardziej wiarygodnym gazem biosygatury. Zidentyfikowano możliwe „fałszywe pozytywy” dla O_2 (Kasting, 1997; Léger *et al.*, 1999). Jednym z takich patologicznych przypadków jest abiotyczna produkcja O_2 w wyniku fotolizy H_2O , po której następuje szybki ucieczka wodoru z niekontrolowanej atmosfery cieplarnianej. Innym takim przypadkiem jest gromadzenie się O_2 w wyniku tego samego procesu abiotycznego na zamrożonej planecie nieco większej od Marsa (0,1–0,2 razy masa Ziemi). Zamrożona powierzchnia zapobiegaby reakcji O_2 z zredukowanymi minerałami w skorupie, a zakres masy uniemożliwiłby nietermiczny ucieczkę atomów O bez wytworzenia wystarczającej ilości ciepła wewnętrznego do podtrzymania wulkanicznego wydzielania gazów zredukowanych. Oba te przypadki można prawdopodobnie zidentyfikować spektroskopowo. Dla „normalnej” planety podobnej do Ziemi, położonej w strefie zamieszkalnej, wolny O_2 jest wiarygodnym wskaźnikiem życia.
2. O_3 jest tak samo wiarygodnym bioindykatorem jak O_2 . Jednakże dostarcza nieco innych informacji. Ze względu na swoją nieliniową zależność od stężenia O_2 , O_3 jest łatwiejszy do wykrycia przy niskich stężeniach O_2 . Jest on jednak stosunkowo słabym wskaźnikiem rzeczywistej ilości O_2 . Trudno jest stwierdzić, który rodzaj informacji jest bardziej przydatny. Pozytywna identyfikacja któregośkolwiek z tych gazów byłaby bardzo ekscytująca i znacząca.
3. Inną kategorią ważnych obserwowalnych cech są para wodna i 8–12 mm

kontinuum. H_2O nie jest bioindykatorem, jednak jego obecność w postaci ciekłej na powierzchni planety jest uważana za niezbędną do życia. Niestety, obserwacje wykazujące obecność wyłącznie gazowej pary wodnej nie pozwalają w wystarczającym stopniu określić warunków, aby stwierdzić, czy atmosfera jest bliska nasycenia. Obserwacja kontinuum 8–12 mm mogłaby w niektórych przypadkach (takich jak współczesna Ziemia) pozwolić nam określić temperaturę powierzchni planety, która również stanowi istotny czynnik ograniczający życie. Jednak atmosfery planet, które są o ponad 20 K cieplejsze od Ziemi (tj. 310 K), będą nieprzezroczyste w tym zakresie z powodu absorpcji kontinuum przez parę wodną. Planety takie są również podatne na niekontrolowany lub „wilgotny” efekt cieplarniany (Kasting, 1988), więc zakres warunków, w których występuje on, a planeta jest również nadająca się do zamieszkania, będzie prawdopodobnie ograniczony. Planety o atmosferze 1 bara i powierzchni cieplejszej niż 340 K stosunkowo szybko utraciłyby wodę (Kasting, 1988). Pokrywa chmur (jak na Wenus) mogłaby również zasłaniać powierzchnię i uniemożliwiać określenie temperatury. W rzeczywistości trudno byłoby lub niemożliwe byłoby odróżnienie planety takiej jak Wenus (z zimną warstwą chmur) od planety o zimnej, pokrytej lodem powierzchni. Tak więc, chociaż istnieją argumenty przemawiające za obserwacją w zakresie średniej podczerwieni, równoważy je dostępność w zakresie widzialnym zarówno cech O_2 , jak i O_3 .

4. Gazy zawierające węgiel, CO_2 i CH_4 , mogą dostarczyć użytecznych informacji. W zakresie średniej podczerwieni CO_2 jest najłatwiejszym do zaobserwowania ze wszystkich gatunków. CO_2 jest niezbędny do fotosyntezy i innych ważnych procesów metabolicznych. Ponadto stanowi on dobry dowód na to, że mamy do czynienia z planetą ziemską. Trudno sobie wyobrazić, jak wilgotna, skalista planeta, z której może uciekać wodór, mogłaby *nie* mieć CO_2 w swojej atmosferze. Nawet gdyby węgiel był wydzielany w postaci bardziej zredukowanej, część jego powinna ulec utlenieniu do CO_2 w wyniku reakcji z tlenem znajdującym się wcześniej w wodzie. Obecność CH_4 dostarczyłaby interesujących, ale niejednoznacznych informacji. Według przynajmniej niektórych modeli ewolucji atmosfery (np. Kasting i Brown, 1998), oczekuje się, że CH_4 był obecny w atmosferze późnego archaiku (2,5–3,0 mld lat temu) w proporcjach mieszania wynoszących 10^{23} . Wysokie stężenia CH_4 w tym czasie wskazywałyby na

produkcji przez bakterie metanogeniczne. Jednak CH_4 mógł również powstać w sposób abiotyczny. Około 1% węgla uwalnianego obecnie przez wulkanizm grzbietów śródmorskich występuje w postaci CH_4 (pozostała część to CO_2). Gdyby wczesna powłoka ziemską była bardziej zredukowana, większość węgla uwalnianego z podmorskich wyziewów mogłaby występować w postaci CH_4 , a stosunek mieszania abiotycznego CH_4 mógłby przekroczyć 10^{-4} (Kasting i Brown, 1998). W związku z tym prawdopodobnie potrzebowalibyśmy dodatkowych informacji, aby zdecydować, czy atmosfera bogata w CH_4 była rzeczywiście oznaką życia.

5. Określenie wielkości planety jest ważnym elementem naszego zrozumienia jej zdolności do podtrzymywania życia. Równając temperaturę barwową wybranych obszarów widma z temperaturą fizyczną i wykorzystując obserwowany strumień, możemy zastosować prawo Plancka, aby uzyskać powierzchnię planety. Możemy wykorzystać obserwowane w Układzie Słonecznym zależności między masą, promieniem i środowiskiem termicznym, aby wywnioskować prawdopodobną masę planety i rozważyć, czy jest to planeta, na której obecnie lub w przeszłości występowała aktywność geologiczna. Aktywność geologiczna jest ważna dla utrzymania zasobów chemicznych niezbędnych do życia, a także warunków sprzyjających zamieszkaniu na powierzchni planety (Lunine, 1999a). W przyszłości możliwe będzie oszacowanie wielkości planety na podstawie promieniowania widzialnego i bliskiej podczerwieni, wykorzystując obserwacje masy fotometrycznej lub masy barwnej.

CODA: KILKA PRZESTRAŻNYCH PRZYKŁADÓW Z NAJNOWSZEJ HISTORII

Wyzwanie związane z interpretacją obserwacji planet ziemskich pod kątem ich podstawowych cech nie różni się zbytnio od wyzwania związanego z wykrywaniem i charakteryzowaniem innych obiektów astronomicznych. Trzy historie stanowią zarówno zachętę, jak i przestrożę w tym zakresie. Przez dziesięciolecia trwała burzliwa debata na temat tego, czy „mgławice spiralne” są dużymi i odległymi skupiskami gwiazd, czy też pobliskimi aglomeracjami gazu. Kwestia ta została ostatecznie rozstrzygnięta w latach dwudziestych XX wieku, kiedy to większe teleskopy umożliwiły rozdzielenie mgławic na duże skupiska gwiazd (Hubble, 1926). W ten sposób wysoka rozdzielczość przestrzenna zwyciężyła nad spektroskopią, ale można spekulować, że postępy w spektroskopowym zrozumieniu gwiazd i technologii spektrometrów ujawniłyby zasadniczą cechę galaktyk, jaką jest ich skład z gwiazd.

W XX wieku poprawiono jakość widm i obrazów Marsa, ale żeby poznać prawdziwą naturę Czerwonej Planety, trzeba było zrobić zbliżenia z kosmosu. Błędna interpretacja danych spektroskopowych, w tym spore przeszacowanie ciśnienia cząstkowego CO_2 oraz sezonowe zmiany koloru i jasności powierzchni, zostały uznane za zmiany roślinności, podczas gdy tak naprawdę były spowodowane globalnym przemieszczaniem się pyłu (Glasstone, 1968). Chociaż zdjęcia Marsa wykonane z Ziemi przez teleskop Hubble'a okazały się spektakularnym sukcesem, zapewniając ostre obrazy, nawet one nie byłyby w stanie ujawnić sieci dolin i innych cech powierzchni wskazujących na to, że powierzchnia Marsa była w przeszłości znacznie bardziej wilgotna niż obecnie (Zahnle, 2001). Wreszcie, 35 lat badań spektroskopowych księżyca Saturna, Tytana, w zakresie od optycznego do milimetrowego, ujawniło obecność atmosfery i wielu interesujących związków węglowodorowych (a także tlenu węgla). Jednak podstawowa natura atmosfery – czy jest ona rzadka i składa się głównie z metanu, czy też gęsta i składa się głównie z gazów nieaktywnych spektroskopowo – nie mogła zostać określona z Ziemi. Konieczne było zbliżenie sondy Voyager 1 i zastosowanie wielu technik teledetekcyjnych na statku kosmicznym, aby odkryć atmosferę azotu czterokrotnie gęstszą na powierzchni Tytana niż atmosfera azotu na Ziemi na poziomie morza. Pomimo możliwości teleskopu Hubble'a i naziemnego obrazowania z wykorzystaniem optyki adaptacyjnej, powierzchnia Tytana pozostaje słabo poznana (Lunine, 1999b).

Wnioski płynące z badań astronomii pozagalaktycznej i Układu Słonecznego

nie powinny zniechęcać do prób charakteryzowania pozasłonecznych ciał wielkości Ziemi, ale podkreślają potrzebę stosowania jak najszerszego zakresu możliwości wykrywania. Jest to zgodne z naszym wnioskiem, że zarówno spektroskopia optyczna, jak i spektroskopia w podczerwieni są ważne, jeśli nie niezbędne, do pełnej charakterystyki planet podobnych do Ziemi wokół innych gwiazd. Powinniśmy być przygotowani na trwające dziesiątki lat debaty na temat natury odkrytych planet, debaty, które mogą nie zostać rozstrzygnięte, dopóki w odległej przyszłości nie zostaną wprowadzone techniki o niewyobrażalnej dotąd mocy.

SKRÓTY

FWHM, pełna szerokość w połowie maksymalnej wartości; PAL, obecny poziom atmosferyczny; SAO, Smithsonian Astro-

; TPF, Terrestrial Planet Finder.

BIBLIOGRAFIA

- Arnold, L., Gillet, S., Lardi re, O., Riaud, P. i Schneider, J. (2002) Test poszukiwania życia na planetach pozas lonecznych: poszukiwanie śladów roślinności ziemskiej w widmie blasku Ziemi. *Astron. Astrophys.* (w druku). Bains, S., Corfield, R.M. i Norris, R.D. (1999) Mechanizmy ocieplenia klimatu pod koniec paleocenu. *Science* 285, 724–727.
- Beichman, C.A., Woolf, N.J. i Lindensmith, C.A. (1999) *The Terrestrial Planet Finder: program NASA mający na celu poszukiwanie planet nadających się do zamieszkania*, publikacja JPL 99-3, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Kalifornia.
- Caroff, L.I. i Des Marais, D.J. (2000) Pale Blue Dot 2 Workshop: habitable and inhabited worlds beyond our Solar System. W: *Pale Blue Dot 2 Workshop*, pod redakcj  L.I. Caroffa i D.J. Des Maraisa, NASA/CP, NASA Ames Research Center, Moffett Field, Kalifornia, str. 320.
- Cruikshank, D.P. (1983) Rozwój badań nad Wenus. W: *Venus*, pod redakcj  D.M. Hunten, L. Colin, T.M. Donahue i V.I. Moroz, University of Arizona Press, Tucson, str. 1–9.
- Komit t ds. Pochodzenia i Ewolucji  ycia (2002) *Znaki  ycia: warsztaty dotycz ce wykrywania  ycia*, National Academy Press, Waszyngton.
- DeDuve, C. (1995) *Vital Dust*, BasicBooks, Nowy Jork. Des Marais, D.J., red. (1997) *The Blue Dot Workshop: Spectroscopic Search for Life on Extrasolar Planets*, publikacja konferencyjna NASA nr 10154, Centrum Badawcze NASA Ames, Moffett Field, Kalifornia.
- Des Marais, D.J. i Walter, M.R. (1999) Astrobiology: exploring the origins, evolution and distribution of life in the universe. *Annu. Rev. Ecol. Systematics* 30, 397–420. Des Marais, D.J., Harwit, M., Jucks, K., Kasting, J., Lin, D., Lunine, J., Schneider, J., Seager, S., Traub, W. i Woolf, N. (2001) *Biosygnatury i wla ciwo ci planetarne, które będą badane w ramach misji TPF*, publikacja JPL 01-008, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Kalifornia, str. 48.
- Ford, E.B., Seager, S. i Turner, E.L. (2001) Charakterystyka Zastosowanie zmienności fotometrycznej w ciągu doby do identyfikacji planet pozas lonecznych typu ziemskiego. *Nature* 412, 885–887.
- Glasstone, S. (1968) *The Book of Mars*, NASA, Waszyngton.
- Goode, P.R., Qui, J., Yurchyshyn, V., Hickey, J., Chu, M.-C., Kolbe, E., Brown, C.T. i Koonin, S.E. (2001) Obserwacje odbicia  wiatla Ziemi. *Geo-phys. Res. Lett.* 28, 1671–1674.
- Goody, R.M. i Yung, Y.L. (1989) *Promieniowanie atmosferyczne: podstawy teoretyczne*, Oxford University Press, Nowy Jork. Gould, S.J. (1996) *Full House*, Three Rivers Press, Nowy Jork.
- Hesselbo, S.P., Grocke, D.R., Jenkyns, H.C., Bjerrum, C.J., Farrimond, P., Morgans Bell, H.S. i Green, O.R. (2000) Masowa dysocjacja hydratów gazowych podczas jurajskiego wydarzenia beztlenowego w oceanach. *Nature* 406, 392–395.
- Hoffman, P.F., Kaufman, A.J., Halverson, G.P. i Schrag, D.P. (1998) Neoproterozoiczna  nie na kula ziemska. *Science* 281, 1342–1346.
- Hubble, E.P. (1926) M glawica spiralna jako układ gwiazdny: Messier 33. *Astrophys. J.* 63, 236–274.
- Ingersoll, A.P. (1969) Niekontrolowany efekt cieplarniany: historia wody na Wenus. *J. Atmos. Sci.* 26, 1191–1198.
- Kasting, J.F. (1988) Niekontrolowany efekt cieplarniany i wilgotna atmosfera oraz ewolucja Ziemi i Wenus. *Icarus* 74, 472–494.
- Kasting, J.F. (1997) Strefy zamieszkalne wok  gwiazd o małej masie i poszukiwanie życia pozaziemskiego. *Orig. Life* 27, 291–307.
- Kasting, J.F. i Brown, L.L. (1998) Przygotowanie sceny: wczesna atmosfera jako źródło związków biogenicznych. W: *The Molecular Origins of Life: Assembling the Pieces of the Puzzle*, pod redakcj  A. Bracka, Cambridge University Press, Nowy Jork, str. 35–56.
- Kasting, J.F. i Donahue, T.M. (1980) Ewolucja ozonu atmosferycznego. *J. Geophys. Res.* 85, 3255–3263.
- Kasting, J.F., Pollack, J.B. i Ackerman, T.P. (1984) Reakcja atmosfery ziemskiej na wzrost strumienia s lonecznego i implikacje dla utraty wody z Wenus. *Icarus* 57, 335–355.
- Kasting, J.F., Whitmire, D.P. i Reynolds, R.T. (1993) Strefy zamieszkalne wok  gwiazd ciągu g wnego. *Icarus* 101, 108–128.
- Kieffer, H.H., Martin, T.Z., Peterfreund, S.R., Jakosky, B.M., Miner, E.D. i Palluconi, F.D. (1977) Mapowanie termiczne i albedo Marsa podczas g wnej misji Viking. *J. Geophys. Res.* 82, 4249–4291.
- Léger, A., Ollivier, M., Altwegg, K. i Woolf, N.J. (1999) Czy obecno  H₂O i O₃ na egzoplanecie jest wiarygodnym znakiem aktywności biologicznej? *Astron. Astrophys.* 341, 304–311.
- Lindal, G.F., Wood, G.E., Hotz, H.B., Sweetnam, D.N., Es-helman, V.R. i Tyler, G.L. (1983) Atmosfera Tytana: analiza pomiarów radiowych Voyagera 1. *Icarus* 53, 348–363.
- Lunine, J.I. (1999a) *Ziemia: ewolucja  wiata nadaj cego si  do zamieszkania*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Lunine, J.I. (1999b) Titan: a world seen but darkly. W: *Our Worlds*, pod redakcj  A. Sterna, Cambridge University Press, Nowy Jork.
- Lunine, J.I. (2001) Wyst powanie planet jowiszowych i zdolno  do podtrzymywania  ycia w uk adach planetarnych. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 98, 809–814.
- Morowitz, H.J. (1992) *Poc tek życia komórkowego*, Yale University Press, New Haven, CT.
- Owen, T. (1980) Poszukiwanie wczesnych form życia w innych układach planetarnych: przyszłe możliwości oferowane przez techniki spektroskopowe. W: *Strategies for the Search for Life in the Universe*, pod redakcj  M. Papagianisa, Reidel, Dordrecht, Holandia, str. 177–185.
- Reynolds, R.T., McKay, C.P. i Kasting, J.F. (1987) Europa, oceany ogrzewane przez p wy i strefy zamieszkalne wok  planet olbrzymich. *Adv. Space Res.* 7, 125–132.
- Sagan, C., Thompson, W.R., Carlson, R., Gurnett, D. i Hord, C. (1993) Poszukiwanie życia na Ziemi z pokładu sondy Galileo. *Nature* 365, 715–721.

- Schneider, J. (1999) Planety pozasłoneczne: metody wykrywania, pierwsze odkrycia i perspektywy na przyszłość. *C.R. Acad. Sci. Ser. 11B* 327(6), 621–634.
- Schneider, J., Labeyrie, A. i Coliolo, F. (2000) Uniwersalny biosygnat: uogólnione chlorofile. W: *2000 Spring Meeting, EOS Transactions*, American Geophysical Union, Waszyngton, DC, Suppl. S30.
- Seiff, A. (1983) Struktura termiczna atmosfery Wenus. W: *Wenus*, pod redakcją D.M. Hunten, L. Colin, T.M. Donahue i V.I. Moroz, University of Arizona Press, Tucson, str. 215–279.
- Selsis, F., Despois, D. i Parisot, J.-P. (2002) Ślady życia na egzoplanetach: czy Darwin może generować fałszywie pozytywne wyniki wykrywania? *Astron. Astrophys.* 388, 985.
- Tomasko, M.G. (1980) Bilans termiczny Wenus w świetle misji Pioneer Venus. *Geophys. Res.* 85, 8187–8189.
- Traub, W.A. i Jucks, K.W. (2002) Możliwa aeronomia układów planetarnych poza Układem Słonecznym. W: *Atmosfery w Układzie Słonecznym: Aeronomia porównawcza*, AGU *Geophysical Monograph* 130, pod redakcją M. Mendillo, A. Nagy i J.H. Waite, American Geophysical Union, Waszyngton, DC, str. 369–380.
- Traub, W.A. i Stier, M.T. (1976) Teoretyczna transmisja atmosferyczna w zakresie średniej i dalekiej podczerwieni na czterech wysokościach. *Appl. Optics* 15, 264–377.
- Woolf, N.J., Smith, P.S., Traub, W.A. i Jucks, K.W. (2002) Widmo blasku Ziemi: bładoniebieska kropka obserwowana z powierzchni Ziemi. *Ap. J.* 574, 430.
- Zahnle, K. (2001) Upadek i upadek imperium marsjańskiego. *Nature* 412, 209–213.

Prośby o przedruk prosimy kierować do:

David J. Des Marais
Ames Research Center
Moffett Field, CA 94035

E-mail: ddesmarais@mail.arc.nasa.gov

Artykuł ten cytowali:

1. Sohan Jheeta. 2013. Ostatnie granice: poszukiwanie życia w innych częściach wszechświata. *Astrofizyka i nauki kosmiczne* . [\[CrossRef\]](#)
2. Andrés Guzmán-Marmolejo, Antígona Segura, Elva Escobar-Briones. 2013. Abiotic Production of Methane in Terrestrial Planets. *Astrobiology* **13**:6, 550-559. [\[Streszczenie\]](#) [\[Pełny tekst HTML\]](#) [\[Pełny tekst PDF\]](#) [\[Pełny tekst PDF z linkami\]](#)
3. S. Seager. 2013. Exoplanet Habitability. *Science* **340**:6132, 577-581. [\[CrossRef\]](#)
4. P. Hedelt, P. von Paris, M. Godolt, S. Gebauer, J. L. Grenfell, H. Rauer, F. Schreier, F. Selsis, T. Trautmann. 2013. Cechy spektralne planet podobnych do Ziemi i ich wykrywalność w różnych odległościach orbitalnych wokół gwiazd typu F, G i K. *Astronomy & Astrophysics* **553**, A9. [\[CrossRef\]](#)
5. Sarah Rugheimer, Lisa Kaltenegger, Andras Zsom, Antígona Segura, Dimitar Sasselov. 2013. Spectral Fingerprints of Earth-like Planets Around FGK Stars. *Astrobiology* **13**:3, 251-269. [\[Streszczenie\]](#) [\[Pełny tekst HTML\]](#) [\[Pełny tekst PDF\]](#) [\[Pełny tekst PDF z linkami\]](#)
6. Kevin France, Cynthia S. Froning, Jeffrey L. Linsky, Aki Roberge, John T. Stocke, Feng Tian, Rachel Bushinsky, Jean-Michel Désert, Pablo Mauas, Mariela Vieytes, Lucianne M. Walkowicz. 2013. PROMIENIOWANIE ULTRAFIOLETOWE ŚWIATŁO ŚRODOWISKO WOKÓŁ M KARŁOWATE EGZOPLANETY GOSPODARZA GWIAZD. *The Astrophysical Journal* **763**:2, 149. [\[CrossRef\]](#)
7. Jacob Haqq-Misra, Michael W. Busch, Sanjoy M. Som, Seth D. Baum. 2013. Korzyści i szkody związane z transmisją w kosmos. *Space Policy* **29**:1, 40-48. [\[CrossRef\]](#)
8. Siddharth Hegde, Lisa Kaltenegger. 2013. Kolory ekstremalnych środowisk egzoplanet. *Astrobiologia* **13**:1, 47-56. [\[Streszczenie\]](#) [\[Pełny tekst HTML\]](#) [\[Pełny tekst PDF\]](#) [\[Pełny tekst PDF z linkami\]](#)
9. M. Vaquez, F. Schreier, S. Gimeno García, D. Kitzmann, B. Patzer, H. Rauer, T. Trautmann. 2013. Przenoszenie promieniowania podczerwonego w atmosferach planet podobnych do Ziemi wokół gwiazd typu F, G, K i M. *Astronomy & Astrophysics* **549**, A26. [\[CrossRef\]](#)
10. L. Kaltenegger, Y. Miguel, S. Rugheimer. 2012. Charakterystyka i atmosfery skalistych planet pozasłonecznych. *International Journal of Astrobiology* **11**:04, 297-307. [\[CrossRef\]](#)
11. Dorian S. Abbot, Nicolas B. Cowan, Fred J. Ciesla. 2012. WSKAZÓWKI DOTYCZĄCE NIEWRAŻLIWOŚCI PLANETARNYCH PROCESÓW WYMIERANIA I STREFY ZDATNEJ DO ŻYCIA NA POWIERZCHNI ZIEMI . *The Astrophysical Journal* **756**:2, 178. [\[CrossRef\]](#)
12. Jonathan Tennyson, Sergei N. Yurchenko. 2012. ExoMol: wykazy linii molekularnych dla planet pozasłonecznych i innych atmosfer. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **425**:1, 21-33. [\[CrossRef\]](#)
13. Germán Bonilla-Rosso, Mariana Peimbert, Luis David Alcaraz, Ismael Hernández, Luis E. Eguarte, Gabriela Olmedo-Alvarez, Valeria Souza. 2012. Porównawcza metagenomika dwóch mat mikrobiologicznych w basenie Cuatro Ciénegas II: struktura i skład społeczności w środowiskach oligotroficznych. *Astrobiology* **12**:7, 659-673. [\[Streszczenie\]](#) [\[Pełny tekst HTML\]](#) [\[Pełny tekst PDF\]](#) [\[Pełny tekst PDF z linkami\]](#) [\[Materiały uzupełniające\]](#)
14. Renyu Hu, Bethany L. Ehlmann, Sara Seager. 2012. TEORETYCZNE SPEKTRUM POWIERZCHNI ZIEMSKICH EGZOPLANET. *The Astrophysical Journal* **752**:1, 7. [\[CrossRef\]](#)
15. A.-L. Maire, R. Galicher, A. Boccaletti, P. Baudoz, J. Schneider, K. L. Cahoy, D. M. Stam, W. A. Traub. 2012. Charakterystyka atmosfery ziemnych planet pozasłonecznych przy użyciu 1,5-metrowego koronograficznego teleskopu kosmicznego. *Astronomy & Astrophysics* . [\[CrossRef\]](#)
16. J.T. O'Malley-James, J.A. Raven, C.S. Cockell, J.S. Greaves. 2012. Życie i światło: egzotyczna fotosynteza w układach podwójnych i wielokrotnych gwiazd. *Astrobiology* **12**:2, 115-124. [\[Streszczenie\]](#) [\[Pełny tekst HTML\]](#) [\[Pełny tekst PDF\]](#) [\[Pełny tekst PDF z linkami\]](#)
17. Randy O. Laine, Douglas N. C. Lin. 2012. INTERAKCJA BLISKICH PLANET Z MAGNETOSFERĄ SWOICH GWIAZD MAJĄCYCH JE W SWOIM SYSTEMIE. II. SUPERZIEMIE JAKO INDUKTORY JEDNOPOLOWE INDUKTORÓW I EWOLUCJA ICH ORBITY. *The Astrophysical Journal* **745**:1, 2. [\[CrossRef\]](#)

18. Sara Seager, Matthew Schrenk, William Bains. 2012. Astrofizyczne spojrzenie na gazy biosygnatur metabolicznych pochodzenia ziemskiego. *Astrobiology* **12**:1, 61-82. [[Streszczenie](#)] [[Pełny tekst HTML](#)] [[Pełny tekst PDF](#)] [[Pełny tekst PDF z linkami](#)]
19. D. S. Spiegel, E. L. Turner. 2011. Analiza bayesowska implikacji astrobiologicznych wczesnego pojawienia się życia na Ziemi. *Proceedings of the National Academy of Sciences* . [[CrossRef](#)]
20. Charles Beichman, Co nowe teleskopy mogą nam powiedzieć o „innych światach” 309-330. [[CrossRef](#)]
21. Timothy A. Livengood, L. Drake Deming, Michael F. A'Hearn, David Charbonneau, Tilak Hewagama, Carey M. Lisse, Lucy A. McFadden, Victoria S. Meadows, Tyler D. Robinson, Sara Seager, Dennis D. Wellnitz. 2011. Właściwości planety podobnej do Ziemi krążącej wokół gwiazdy podobnej do Słońca: Ziemia obserwowana przez misję EPOXI. *Astrobiology* **11**:9, 907-930. [[Streszczenie](#)] [[Pełny tekst HTML](#)] [[Pełny tekst PDF](#)] [[Pełny tekst PDF z linkami](#)]
22. Jacob Haqq-Misra, Ravi Kumar Kopparapu. 2011. O prawdopodobieństwie występowania artefaktów pozaziemskich w Układzie Słonecznym. *Acta Astronautica* . [[CrossRef](#)]
23. Tyler D. Robinson. 2011. MODELOWANIE SPEKTRUM PODCZERWONEGO UKŁADU ZIEMIA-KSIĘŻYC: IMPLIKACJE DLA WYKRYWANIA I CHARAKTERYSTYKI PLANET POZASŁONOWYCH PODOBNYCH DO ZIEMI / ICH KSIĘŻYCOWOPODOBNYCH TOWARZYSZY. *Astrophysical Journal* **741**:1, 51. [[CrossRef](#)]
24. Jiaguo Qi, Yoshio Inoue, Narumon Wiangwang. Teledetekcja hiperspektralna w badaniach zmian globalnych 69-90. [[CrossRef](#)]
25. Hajime Kawahara, Yuka Fujii. 2011. MAPOWANIE CHMUR I TERENÓW PLANET PODOBNYCH DO ZIEMI NA PODSTAWIE ZMIENNOŚCI FOTOMETRYCZNEJ: DEMONSTRACJA NA PRZYKŁADZIE PLANET NA ORBITACH CZOŁOWYCH. *The Astrophysical Journal* **739**:2, L62. [[CrossRef](#)]
26. Yuka Fujii, Hajime Kawahara, Yasushi Suto, Satoru Fukuda, Teruyuki Nakajima, Timothy A. Livengood, Edwin L. Turner. 2011. KOLORY DRUGIEJ ZIEMI. II. WPŁYW CHMUR NA CHARAKTERYSTYKĘ FOTOMETRYCZNAŁ EGZOPLANET PODOBNYCH DO ZIEMI. *The Astrophysical Journal* **738**:2, 184. [[CrossRef](#)]
27. Ewa Sokol, Robert J. Noll, R. Graham Cooks, Luther W. Beegle, Hugh I. Kim, Isik Kanik. 2011. Miniaturowy spektrometr masowy wyposażony w jonizację elektrosprejową i desorpcyjną jonizację elektrosprejową do bezpośredniej analizy związków organicznych z ciał stałych i roztworów. *International Journal of Mass Spectrometry* **306**:2-3, 187-195. [[CrossRef](#)]
28. Pascal Hedelt, R. Alonso, T. Brown, M. Collados Vera, H. Rauer, H. Schleicher, W. Schmidt, F. Schreier, R. Titz. 2011. Przejście Wenus w 2004 r.: ilustracja możliwości spektroskopii transmisyjnej planet pozasłonecznych. *Astronomy & Astrophysics* . [[CrossRef](#)]
29. Philip von Paris, J. Cabrera, M. Godolt, J. L. Grenfell, P. Hedelt, H. Rauer, F. Schreier, B. Stracke. 2011. Charakterystyka spektroskopowa atmosfery potencjalnie nadającej się do zamieszkania planety: GL 581 d jako modelowy przypadek badawczy. *Astronomy & Astrophysics* . [[CrossRef](#)]
30. Lewis R. Dartnell. 2011. Promieniowanie jonizujące a życie. *Astrobiology* **11**:6, 551-582. [[Streszczenie](#)] [[Pełny tekst HTML](#)] [[Pełny tekst PDF](#)] [[Pełny tekst PDF z linkami](#)]
31. Dimitra Atri, Julia DeMarines, Jacob Haqq-Misra. 2011. Protokół przesyłania wiadomości do pozaziemskiej inteligencji. *Polityka kosmiczna* . [[CrossRef](#)]
32. Shawn D. Domagal-Goldman, Victoria S. Meadows, Mark W. Claire, James F. Kasting. 2011. Wykorzystanie biogenicznych gazów siarkowych jako zdalnie wykrywalnych biosygnatur na planetach beztlenowych. *Astrobiologia* **11**:5, 419-441. [[Streszczenie](#)] [[Pełny tekst HTML](#)] [[Pełny tekst PDF](#)] [[Pełny tekst PDF z linkami](#)]
33. L. Kaltenegger. 2011. Biomarkery światów nadających się do zamieszkania – superziemi i ziemie. *Materiały Międzynarodowej Unii Astronomicznej* **7**:S280, 302-312. [[CrossRef](#)]
34. Seth D. Baum, Jacob D. Haqq-Misra, Shawn D. Domagal-Goldman. 2011. Czy kontakt z istotami pozaziemskimi przyniósłby korzyści czy szkody ludzkości? Analiza scenariusza. *Acta Astronautica* **68**:11-12, 2114-2129. [[CrossRef](#)]

35. Lisa Kaltenegger, Antígona Segura, Subhanjoy Mohanty. 2011. MODEL SPECTRA OF THE FIRST POTENTIALLY HABITABLE SUPER-EARTH—GI581d. *The Astrophysical Journal* **733**:1, 35. [\[CrossRef\]](#)
36. A. Léger, M. Fontecave, A. Labeyrie, B. Samuel, O. Demangeon, D. Valencia. 2011. Czy obecność tlenu na egzoplanecie jest wiarygodnym biosygnałem? *Astrobiology* **11**:4, 335-341. [\[Streszczenie\]](#) [\[Pełny tekst HTML\]](#) [\[Pełny tekst PDF\]](#) [\[Pełny tekst PDF z linkami\]](#)
37. H. Rauer, S. Gebauer, P. v. Paris, J. Cabrera, M. Godolt, J. L. Grenfell, A. Belu, F. Selsis, P. Hedelt, F. Schreier. 2011. Potencjalne biosygnaty w atmosferach superziemi. *Astronomy & Astrophysics* **529**, A8. [\[CrossRef\]](#)
38. Carolyn A. Crow, L. A. McFadden, T. Robinson, V. S. Meadows, T. A. Livengood, T. Hewagama, R. K. Barry, L. D. Deming, C. M. Lisse, Dennis Wellnitz. 2011. PODGLĄD Z EPOXI: KOLORY W NASZYM UKŁADZIE SŁONECZNYM JAKO ANALOGIA DLA PLANET POZAUKŁADOWYCH. *The Astrophysical Journal* **729**:2, 130. [\[CrossRef\]](#)
39. M. E. Zugger, J. F. Kasting, D. M. Williams, T. J. Kane, C. R. Philbrick. 2010. ROZPROSZENIE ŚWIATŁA Z OCEANÓW I ATMOSFER PLANET POZAUKOWYCH. *The Astrophysical Journal* **723**:2, 1168-1179. [\[CrossRef\]](#)
40. Christopher E. Doughty, Adam Wolf. 2010. Wykrywanie wielokomórkowych form życia podobnych do drzew na planetach pozasłonecznych. *Astrobiology* **10**:9, 869-879. [\[Streszczenie\]](#) [\[Pełny tekst HTML\]](#) [\[Pełny tekst PDF\]](#) [\[Pełny tekst PDF z linkami\]](#)
41. Antígona Segura, Lucianne M. Walkowicz, Victoria Meadows, James Kasting, Suzanne Hawley. 2010. Wpływ silnego rozbłysku gwiazdowego na chemiczne właściwości atmosfery planety podobnej do Ziemi krążącej wokół karła typu M. *Astrobiology* **10**:7, 751-771. [\[Streszczenie\]](#) [\[Pełny tekst HTML\]](#) [\[Pełny tekst PDF\]](#) [\[Pełny tekst PDF z linkami\]](#)
42. S. R. Martin, A. J. Booth. 2010. Demonstracja wykrywania egzoplanet za pomocą układu teleskopów podczerwieni. *Astronomy and Astrophysics* **520**, A96. [\[CrossRef\]](#)
43. Werner von Bloh, Christine Bounama, Siegfried Franck. 2010. Fotosynteza w Drodze Mlecznej. *Plant Science* **178**:6, 485-490. [\[CrossRef\]](#)
44. Yuka Fujii, Hajime Kawahara, Yasushi Suto, Atsushi Taruya, Satoru Fukuda, Teruyuki Nakajima, Edwin L. Turner. 2010. KOLORY DRUGIEJ ZIEMI: OŚACOWANIE UDZIAŁU OCEANÓW, ŁĄDÓW I ROŚLINNOŚCI W POWIERZCHNI EXOPLANET PODOBNYCH DO ZIEMI. *The Astrophysical Journal* **715**:2, 866-880. [\[CrossRef\]](#)
45. Brendan Burns, Falcia Goh, Michelle Allen, Rachael Shi, Brett Neilan. Istniejące analogie mikrobiologicznego pochodzenia życia 237-254. [\[CrossRef\]](#)
46. Dmitry Savransky, N. Jeremy Kasdin, Eric Cady. 2010. Analiza projektów misji poszukiwania planet. *Publikacje Towarzystwa Astronomicznego Pacyfiku* **122**:890, 401-419. [\[CrossRef\]](#)
47. S. R. Martin, A. J. Booth. 2010. Silne tłumienie światła gwiazd wystarczające do bezpośredniego wykrywania egzoplanet w strefie zamieszkalnej. *Astronomy and Astrophysics* **511**, L1. [\[CrossRef\]](#)
48. Eric Cady, N. J. Kasdin, Stuart Shaklan. 2010. Projektowanie asymetrycznych i rozgałęzionych płatków do okultatorów służących do wykrywania planet. *Optics Express* **18**:2, 523. [\[CrossRef\]](#)
49. Lisa Kaltenegger, Frank Selsis, Malcolm Fridlund, Helmut Lammer, Charles Beichman, William Danchi, Carlos Eiroa, Thomas Henning, Tom Herbst, Alain Léger, René Liseau, Jonathan Lunine, Francesco Paresce, Alan Penny, Andreas Quirrenbach, Huub Röttgering, Jean Schneider, Daphne Stam, Giovanna Tinetti, Glenn J. White. 2010. Rozszyfrowanie spektralnych odcisków palców planet pozasłonecznych nadających się do zamieszkania. *Astrobiology* **10**:1, 89-102. [\[Streszczenie\]](#) [\[Pełny tekst HTML\]](#) [\[Pełny tekst PDF\]](#) [\[Pełny tekst PDF z linkami\]](#)
50. Ch. Beichman. 2010. Poszukiwanie innych planet i życia. *Seria publikacji EAS* **41**, 3-23. [\[CrossRef\]](#)
51. L. Kaltenegger, F. Selsis. 2010. Spektralne odciski palców zdolności do podtrzymywania życia. *Seria publikacji EAS* **41**, 485-504. [\[CrossRef\]](#)
52. Kevin P. Hand, Christopher P. McKay, Carl B. Pilcher. 2010. Spektroskopowe i spektrometryczne rozróżnienie między materiałem abiotycznym a biogenicznym na lodowych światach. *Materiały Międzynarodowej Unii Astronomicznej* **6**:S269, 165-176. [\[CrossRef\]](#)

53. Charles S. Cockell, Lisa Kaltenegger, John A. Raven. 2009. Krytyczna fotosynteza — tlen pozasłoneczny bez śladów biologicznych na powierzchni. *Astrobiology* 9:7, 623-636. [[Streszczenie](#)] [[Pełny tekst w formacie PDF](#)] [[Pełny tekst w formacie PDF z linkami](#)]
54. P. H. H. Oakley, W. Cash. 2009. KONSTRUKCJA MODELU ZIEMI: ANALIZA KRZYWYCH ŚWIATŁA EGZOPLANET I MAPOWANIE NASTĘPNEJ ZIEMI ZA POMOCĄ NOWEGO WORLDS OBSERVER. *The Astrophysical Journal* 700:2, 1428-1439. [[CrossRef](#)]
55. Kaito Yokochi, Alexander V. Tavrov, Jun Nishikawa, Naoshi Murakami, Lyu Abe, Motohide Tamura, Mitsuo Takeda, Takashi Kurokawa. 2009. Achromatyczne głębokie zerowanie za pomocą trójwymiarowego interferometru Sagnaca. *Optics Letters* 34:13, 1985. [[CrossRef](#)]
56. Lisa Kaltenegger, Wesley A. Traub. 2009. PRZEJŚCIA PLANET PODOBNYCH DO ZIEMI. *The Astrophysical Journal* 698:1, 519-527. [[CrossRef](#)]
57. E. Serabyn. 2009. OBRAZOWANIE EKSPANET O WYSOKIM KONTRASIE I WĄSKIM POLU WIDZENIA ZA POMOCĄ TELESKOPU WIELOKROTNEGO OTWORU Z FAZOWANYM UKŁADEM KORONOGRAFÓW. *The Astrophysical Journal* 697:2, 1334-1340. [[CrossRef](#)]
58. H. Lammer, J. H. Bredehöft, A. Coustenis, M. L. Khodachenko, L. Kaltenegger, O. Grasset, D. Prieur, F. Raulin, P. Ehrenfreund, M. Yamauchi, J.-E. Wahlund, J.-M. Grießmeier, G. Stangl, C. S. Cockell, Yu. N. Kulikov, J. L. Grenfell, H. Rauer. 2009. Co sprawia, że planeta jest nadająca się do zamieszkania? *The Astronomy and Astrophysics Review* 17:2, 181-249. [[CrossRef](#)]
59. Nicholas A. Moskovitz, Eric Gaidos, Darren M. Williams. 2009. Wpływ satelitów podobnych do Księżyca na krzywe jasności podczerwieni planet podobnych do Ziemi. *Astrobiology* 9:3, 269-277. [[Streszczenie](#)] [[Pełny tekst w formacie PDF](#)] [[Pełny tekst w formacie PDF z linkami](#)]
60. Sally V. Langford, J. Stuart B. Wyithe, Edwin L. Turner. 2009. Zmienność fotometryczna w obserwacjach blasku Ziemi. *Astrobiology* 9:3, 305-310. [[Streszczenie](#)] [[Pełny tekst w formacie PDF](#)] [[Pełny tekst w formacie PDF z linkami](#)]
61. C.S. Cockell, A. Léger, M. Fridlund, T.M. Herbst, L. Kaltenegger, O. Absil, C. Beichman, W. Benz, M. Blanc, A. Brack, A. Chelli, L. Colangeli, H. Cottin, F. Coudé du Foresto, W.C. Danchi, D. Defrère, J.-W. den Herder, C. Eiroa, J. Greaves, T. Henning, K.J. Johnston, H. Jones, L. Labadie, H. Lammer, R. Launhardt, P. Lawson, O.P. Lay, J.-M. LeDuigou, R. Liseau, F. Malbet, S.R. Martin, D. Mawet, D. Mourard, C. Moutou, L.M. Mugnier, M. Ollivier, F. Paresce, A. Quirrenbach, Y.D. Rabbia, J.A. Raven, H.J.A. Rottgering, D. Rouan, N.C. Santos, F. Selsis, E. Serabyn, H. Shibai, M. Tamura, E. Thiébaud, F. Westall, G.J. White. 2009. Darwin — misja wykrywania i poszukiwania życia na planetach pozasłonecznych. *Astrobiology* 9:1, 1-22. [[Streszczenie](#)] [[Pełny tekst w formacie PDF](#)] [[Pełny tekst w formacie PDF z linkami](#)]
62. S. Ida, D. N. C. Lin. 2008. W kierunku deterministycznego modelu formowania się planet. V. Akumulacja w pobliżu linii lodowej i superziemi. *The Astrophysical Journal* 685:1, 584-595. [[CrossRef](#)]
63. M Ollivier, B Chazelas, P Bordé. 2008. Charakterystyka planet podobnych do Ziemi: od CoRoT do DARWIN/TPF i dalej. *Physica Scripta* T130, 014031. [[CrossRef](#)]
64. Cullen H. Blake, Joshua S. Bloom, David W. Latham, Andrew H. Szentgyorgyi, Michael F. Skrutskie, Emilio E. Falco, Dan S. Starr. 2008. Monitorowanie ultra chłodnych karłów w bliskiej podczerwieni: perspektywy poszukiwania tranzytujących towarzyszy. *Publikacje Towarzystwa Astronomicznego Pacyfiku* 120:870, 860-871. [[CrossRef](#)]
65. Darren M. Williams, Eric Gaidos. 2008. Wykrywanie odbicia światła gwiazd na oceanach odległych planet. *Icarus* 195:2, 927-937. [[CrossRef](#)]
66. S. Casertano, M. G. Lattanzi, A. Sozzetti, A. Spagna, S. Jancart, R. Morbidelli, R. Pannunzio, D. Pourbaix, D. Queloz. 2008. Program testów z podwójnie ślepą próbą do astrometrycznego wykrywania planet za pomocą Gaia. *Astronomy and Astrophysics* 482:2, 699-729. [[CrossRef](#)]
67. R.A. Toth, L.R. Brown, C.E. Miller, V. Malathy Devi, D.Chris. Benner. 2008. Baza danych spektroskopowych parametrów linii CO2: 4300–7000 cm⁻¹. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 109:6, 906-921. [[CrossRef](#)]
68. Luc Arnold. 2008. Obserwacja roślinności w świetle Ziemi i implikacje dla wykrywania życia na innych planetach. *Space Science Reviews* 135:1-4, 323-333. [[CrossRef](#)]

69. A. Belu, E. Thiébaud, M. Ollivier, G. Lagache, F. Selsis, F. Vakili. 2007. Model sceny układów egzoplanetarnych do wykorzystania w symulacjach wykrywania i charakteryzowania planet. *Astronomy and Astrophysics* **476**:2, 1005-1018. [[CrossRef](#)]
70. J.-L. Bertaux, M. Carr, D. J. Des Marais, E. Gaidos. 2007. Rozmowy na temat zdolności światów do podtrzymywania życia: znaczenie substancji lotnych. *Space Science Reviews* **129**:1-3, 123-165. [[CrossRef](#)]
71. Kathryn E. Fishbaugh, David J. Marais, Oleg Korabiev, Philippe Lognonne, François Raulin. 2007. Wprowadzenie: Wielodyscyplinarne podejście do zdolności do podtrzymywania życia. *Space Science Reviews* **129**:1-3, 1-5. [[CrossRef](#)]
72. Robert J. Vanderbei, Eric Cady, N. Jeremy Kasdin. 2007. Optymalna konstrukcja okultatora do wykrywania planet pozasłonecznych. *The Astrophysical Journal* **665**:1, 794-798. [[CrossRef](#)]
73. John T. Trauger, Wesley A. Traub. 2007. Laboratorium demonstruje możliwość obrazowania planet pozasłonecznych podobnych do Ziemi. *Nature* **446**:7137, 771-773. [[CrossRef](#)]
74. Jeremy Bailey. 2007. Tęcze, polaryzacja i poszukiwanie planet nadających się do zamieszkania. *Astrobiologia* **7**:2, 320-332. [[Streszczenie](#)] [[Pełny tekst w formacie PDF](#)] [[Pełny tekst w formacie PDF z linkami](#)]
75. W. VONBLOH, C. BOUNAMA, S. FRANCK. 2007. Dynamiczna zdolność do podtrzymywania życia na planetach podobnych do Ziemi w 86 układach planetarnych poza Układem Słonecznym. *Planetary and Space Science* **55**:5, 651-660. [[CrossRef](#)]
76. J. GRENFELL, B. STRACKE, P. VONPARIS, B. PATZER, R. TITZ, A. SEGURA, H. RAUER. 2007. Reakcja chemii atmosferycznej na planetach podobnych do Ziemi wokół gwiazd typu F, G i K na niewielkie zmiany odległości orbitalnej. *Planetary and Space Science* **55**:5, 661-671. [[CrossRef](#)]
77. John Scalo, Lisa Kaltenegger, Antígona Segura, Malcolm Fridlund, Ignasi Ribas, Yu. N. Kulikov, John L. Grenfell, Heike Rauer, Petra Odert, Martin Leitzinger, F. Selsis, Maxim L. Khodachenko, Carlos Eiroa, Jim Kasting, Helmut Lammer. 2007. Gwiazdy typu M jako cele poszukiwań planet pozasłonecznych i wykrywania biosygnatur. *Astrobiology* **7**:1, 85-166. [[Streszczenie](#)] [[Pełny tekst w formacie PDF](#)] [[Pełny tekst w formacie PDF z linkami](#)]
78. John Lee Grenfell, Jean-Mathias Grießmeier, Beate Patzer, Heike Rauer, Antígona Segura, Anja Stadelmann, Barbara Stracke, Ruth Titz, Philip Von Paris. 2007. Reakcja biomarkerów na NO_x wywołane galaktycznym promieniowaniem kosmicznym i efekt cieplarniany metanu w atmosferze planety podobnej do Ziemi krążącej wokół gwiazdy karłowatej typu M. *Astrobiology* **7**:1, 208-221. [[Streszczenie](#)] [[Pełny tekst PDF](#)] [[Pełny tekst PDF z linkami](#)]
79. John Scalo, Lisa Kaltenegger, Antígona Segura, Malcolm Fridlund, Ignasi Ribas, Yu. N. Kulikov, John L. Grenfell, Heike Rauer, Petra Odert, Martin Leitzinger, F. Selsis, Maxim L. Khodachenko, Carlos Eiroa, Jim Kasting, Helmut Lammer. 2007. Gwiazdy typu M jako cele poszukiwań planet pozasłonecznych typu ziemskiego i wykrywania biosygnatur. *Astrobiology* **7**:1, 85-166. [[CrossRef](#)]
80. Lisa Kaltenegger, Wesley A. Traub, Kenneth W. Jucks. 2007. Ewolucja spektralna planety podobnej do Ziemi. *The Astrophysical Journal* **658**:1, 598. [[CrossRef](#)]
81. M. W. CLAIRE, D. C. CATLING, K. J. ZAHNLE. 2006. Modelowanie biogeochemiczne wzrostu zawartości tlenu w atmosferze. *Geobiology* **4**:4, 239-269. [[CrossRef](#)]
82. Redaktorzy: L.J. Mix, J.C. Armstrong, A.M. Mandell, A.C. Mosier, J. Raymond, S.N. Raymond, F.J. Stewart, K. von Braun i O. Zhaxybayeva Autorzy: L. Billings, V. Cameron, M. Claire, G.J. Dick, S.D. Domagal-Goldman, E.J. Javaux, O.J. Johnson, C. Laws, M.S. Race, J. Rask, J.D. Rummel, R.T. Schelble i S. Vance. 2006. Podręcznik astrobiologii: zarys wiedzy ogólnej — wersja 1, 2006. *Astrobiology* **6**:5, 735-813. [[Streszczenie](#)] [[Pełny tekst w formacie PDF](#)] [[Pełny tekst w formacie PDF z linkami](#)]
83. Benjamin F. Lane, Matthew W. Mutterspaugh, Michael Shao. 2006. Kalibracja interferometrycznego zerowania. *The Astrophysical Journal* **648**:2, 1276-1284. [[CrossRef](#)]
84. Dr Gustavo Porto de Mello, Eduardo Fernandez del Peloso, Luan Ghezzi. 2006. Gwiazdy interesujące z punktu widzenia astrobiologii w odległości do 10 parseków od Słońca. *Astrobiology* **6**:2, 308-331. [[Streszczenie](#)] [[Pełny tekst w formacie PDF](#)] [[Pełny tekst w formacie PDF z linkami](#)]
85. Stefan Helmreich. 2006. Ślad życia: projektowanie wyobraźni astrobiologicznej. *Grey Room* **23**, 66-95. [[CrossRef](#)]

86. Pascal J. Borde, Wesley A. Traub. 2006. Obrazy o wysokim kontraście z kosmosu: eliminacja plamek w warunkach niskiej aberracji. *The Astrophysical Journal* **638**:1, 488-498. [\[CrossRef\]](#)
87. Margaret C. Turnbull, Wesley A. Traub, Kenneth W. Jucks, Neville J. Woolf, Michael R. Meyer, Nadya Gorlova, Michael F. Skrutskie, John C. Wilson. 2006. Spectrum of a Habitable World: Earthshine in the Near-Infrared. *The Astrophysical Journal* **644**:1, 551. [\[CrossRef\]](#)
88. Giovanna Tinetti. 2006. Charakterystyka pozazłonecznych planet ziemskich na podstawie widm odbitych, emitowanych i transmitowanych. *Origins of Life and Evolution of Biospheres* **36**:5-6, 541. [\[CrossRef\]](#)
89. E. JAVAUX. 2006. Życie ekstremalne na Ziemi – przeszłość, teraźniejszość i być może przyszłość. *Badania w mikrobiologii* **157**:1, 37-48. [\[CrossRef\]](#)
90. Pilar Montanes-Rodriguez, E. Palle, P. R. Goode, F. J. Martin-Torres. 2006. Sygnatura roślinności w obserwowanym globalnie zintegrowanym spektrum Ziemi z uwzględnieniem jednoczesnych danych dotyczących chmur: zastosowania dla planet pozazłonecznych. *The Astrophysical Journal* **651**:1, 544. [\[CrossRef\]](#)
91. Antígona Segura, James F. Kasting, Victoria Meadows, Martin Cohen, John Scalo, David Crisp, Rebecca A.H. Butler, Giovanna Tinetti. 2005. Biosygnatury z planet podobnych do Ziemi wokół karłów typu M. *Astrobiology* **5**:6, 706-725. [\[Streszczenie\]](#) [\[Pełny tekst w formacie PDF\]](#) [\[Pełny tekst w formacie PDF z linkami\]](#)
92. B. MENNESSON, A. LEGER, M. OLLIVIER. 2005. Bezpośrednie wykrywanie i charakterystyka planet pozazłonecznych: interferometr kosmiczny Mariotti. *Icarus* **178**:2, 570-588. [\[CrossRef\]](#)
93. Alessandro Sozzetti. 2005. Metody astrometryczne i oprzyrządowanie do identyfikacji i charakteryzowania planet pozazłonecznych: przegląd. *Publikacje Towarzystwa Astronomicznego Pacyfiku* **117**:836, 1021-1048. [\[CrossRef\]](#)
94. Giovanna Tinetti, Victoria S. Meadows, David Crisp, William Fong, Thangasamy Velusamy, Heather Snively. 2005. Średnie spektrum syntetyczne dysku Marsa. *Astrobiologia* **5**:4, 461-482. [\[Streszczenie\]](#) [\[Pełny tekst w formacie PDF\]](#) [\[Pełny tekst w formacie PDF z linkami\]](#)
95. Robert J. Vanderbei, Wesley A. Traub. 2005. Mapowanie źrenicy w dwóch wymiarach dla obrazowania o wysokim kontraście. *The Astrophysical Journal* **626**:2, 1079-1090. [\[CrossRef\]](#)
96. S. Seager, E.L. Turner, J. Schafer, E.B. Ford. 2005. Czerwona krawędź roślinności: potencjalny spektroskopowy biosygnatura roślin pozaziemskich. *Astrobiologia* **5**:3, 372-390. [\[Streszczenie\]](#) [\[Pełny tekst w formacie PDF\]](#) [\[Pełny tekst w formacie PDF z linkami\]](#)
97. Dr D.M. Williams, R.F. Knacke. 2004. Poszukiwanie księżyców planetarnych w widmach odległych Jowiszów. *Astrobiology* **4**:3, 400-403. [\[Streszczenie\]](#) [\[Pełny tekst PDF\]](#) [\[Pełny tekst PDF z linkami\]](#)
98. Jeffrey L. Bada. 2004. Jak powstało życie na Ziemi: raport o stanie wiedzy. *Earth and Planetary Science Letters* **226**:1-2, 1-15. [\[CrossRef\]](#)
99. Weidong Yang, Alexander B. Kostinski. 2004. Jednostronna achromatyczna apodizacja fazowa do obrazowania planet pozazłonecznych. *The Astrophysical Journal* **605**:2, 892-901. [\[CrossRef\]](#)
100. James B. Breckinridge, Ben R. Oppenheimer. 2004. Efekty polaryzacji w koronografach odbijających światło białe stosowanych w astronomii. *The Astrophysical Journal* **600**:2, 1091-1098. [\[CrossRef\]](#)
101. Antígona Segura, Kara Krelve, James F. Kasting, Darrell Sommerlatt, Victoria Meadows, David Crisp, Martin Cohen, Eli Mlawer. 2003. Stężenia ozonu i strumienie promieniowania ultrafioletowego na planetach podobnych do Ziemi krążących wokół innych gwiazd. *Astrobiology* **3**:4, 689-708. [\[Streszczenie\]](#) [\[Pełny tekst w formacie PDF\]](#) [\[Pełny tekst w formacie PDF z linkami\]](#)
102. Roger F. Knacke. 2003. Możliwości wykrycia życia mikrobiologicznego na planetach pozazłonecznych. *Astrobiologia* **3**:3, 531-541. [\[Streszczenie\]](#) [\[Pełny tekst PDF\]](#) [\[Pełny tekst PDF z linkami\]](#)
103. J. Brad Dalton, Rakesh Mogul, Hiromi K. Kagawa, Suzanne L. Chan, Corey S. Jamieson. 2003. Wykrywanie potencjalnych śladów mikroskopijnych organizmów na Europie za pomocą promieniowania bliskiej podczerwieni. *Astrobiologia* **3**:3, 505-529. [\[Streszczenie\]](#) [\[Pełny tekst w formacie PDF\]](#) [\[Pełny tekst w formacie PDF z linkami\]](#)
104. Carl B. Pilcher. 2003. Biosignatures of Early Earths. *Astrobiology* **3**:3, 471-486. [\[Streszczenie\]](#) [\[Pełny tekst w formacie PDF\]](#) [\[Pełny tekst w formacie PDF z linkami\]](#)
105. James F. Kasting, David Catling. 2003. EVOLUTION OF A HABITABLE PLANET. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **41**:1, 429-463. [\[CrossRef\]](#)

106. 2003. Astrobiology Literature Watch. *Astrobiology* 3:2, 429-435. [[Cytat](#)] [[Pełny tekst PDF](#)] [[Pełny tekst PDF z linkami](#)]
107. James T Staley. 2003. Astrobiologia, nauka transcendentna: obietnica astrobiologii jako integracyjnego podejścia do edukacji i badań w dziedzinie nauk ścisłych i inżynierii. *Current Opinion in Biotechnology* 14:3, 347-354. [[CrossRef](#)]
108. Brendlyn D Faison. Wkład mikrobiologii w poszukiwanie życia pozaziemskiego 53, 397-435. [[CrossRef](#)]
109. Brad M. Bebout, Steven P. Carpenter, David J. Des Marais, Mykell Discipulo, Tsegereda Embaye, Ferran Garcia-Pichel, Tori M. Hoehler, Mary Hogan, Linda L. Jahnke, Richard M. Keller, Scott R. Miller, Leslie E. Prufert-Bebout, Chris Raleigh, Michael Rothrock, Kendra Turk. 2002. Długoterminowe manipulacje nienaruszonymi społecznościami mat mikrobiologicznych w szklarniowym laboratorium: symulacja obecnych i przeszłych środowisk terenowych Ziemi. *Astrobiology* 2:4, 383-402. [[Streszczenie](#)] [[Pełny tekst w formacie PDF](#)] [[Pełny tekst w formacie PDF z linkami](#)]
110. 2002. Rozpoznawanie i interpretacja biosygnatur. *Astrobiology* 2:4, 605-639. [[Cytat](#)] [[Pełny tekst w formacie PDF](#)] [[Pełny tekst w formacie PDF z linkami](#)]