

Rośliny na stacjach kosmicznych – fantazja, czy nowy kierunek rozwoju rolnictwa?

Franciszek DUBERT, Agnieszka PŁĄŻEK

DUBERT F., PŁĄŻEK A. 2007. **Plants on the spacecraft – a fantasy or the new trend in agriculture development.** *Wiadomości Botaniczne* 51(3/4): 7–13.

One of the factors most limiting the time of space journeys is the necessity of supplying of spacecraft crew in proper mass of food and carbon dioxide absorbers. In the presented paper the real possibility of solution of the problem have been discussed.

Plant culture in space station during prolonged journeys permits to decrease their costs. Besides being food source plants assimilate carbon dioxide exhaled by cosmonauts and produce oxygen needed to respiration. According to authors' opinion cereals and especially wheat seem to be the best for culture in the space station. However, this decision should be preceded by thoroughful studies performed in Earth's conditions leading to breeding of plants characterized by optimal morphological and physiological traits.

Key problem in the studies will be obtaining of plants of remarkable higher value of harvest index i.e. the share of consumable mass in whole plant mass. In the paper several possibilities of breeding of such plants have been described. Moreover, some technical and climatic factors of plant cultivation as well as solutions relating to utilization of post-harvest leftovers have been discussed.

The article could be seemed by some Readers as an example of science fiction literature, however the authors used available knowledge allowing a realistic look into the future of space flights.

KEY WORDS: harvest index, LEDs, main food components, microgravity, vegetation module

Franciszek Dubert, Instytut Fizjologii Roślin Polskiej Akademii Nauk, ul. Niezapominajek 2, 30-239 Kraków; Katedra Fizjologii Roślin, Wydział Rolniczo-Ekonomiczny Akademii Rolniczej w Krakowie, ul. Podłużna 3, 30-239 Kraków, e-mail: f.dubert@ifr-pan.krakow.pl; Agnieszka Płązek, Katedra Fizjologii Roślin, Wydział Rolniczo-Ekonomiczny Akademii Rolniczej w Krakowie, ul. Podłużna 3, 30-239 Kraków, e-mail: rrplazek@cyf-kr.edu.pl

Problem uprawy roślin na stacjach kosmicznych będzie musiał być rozwiązany w niedalekiej przyszłości w aspekcie planowanych podróży człowieka na inne planety. Zauważmy, że w całej historii cywilizacji rośliny towarzyszyły ludziom w ich wędrówkach. Wybierając się na dalekie wyprawy zabierali oni ze sobą rośliny lub ich nasiona do uprawy w nowym miejscu osiedlenia. Rośliny wędrowały więc po morzach,

oceanach, przekraczały pustynie i łańcuchy górskie, z miejsca, gdzie według przekazów mieścił się biblijny raj, na ziemi okresowo pokryte śniegiem i lodem. Dlaczego więc podczas tej największej wędrówki w historii ludzkości – wyprawy w kosmos – miałyby być inaczej? Problem ten dopiero się rodzi, bo jak dotąd wyprawy poza Ziemię są krótkie, choć zanotowano już wielomiesięczne pobyty kosmonautów

na stacjach orbitalnych. Kiedy odległość i czas wypraw będą się wydłużać, zaczniemy uprawiać rośliny na pokarm dla ludzi żyjących na stacjach kosmicznych i podróżujących statkami kosmicznymi. Lista korzyści z takiej uprawy jest długa, tak jak długa będzie lista problemów, które się dopiero ujawnią w czasie realizacji tych ambitnych planów. Zapewne powstanie nowa dziedzina nauki – fizjologia plonowania roślin w warunkach braku grawitacji i zapewne trzeba będzie ze znacznym wyprzedzeniem rozpocząć związany z tym wielki program badawczy.

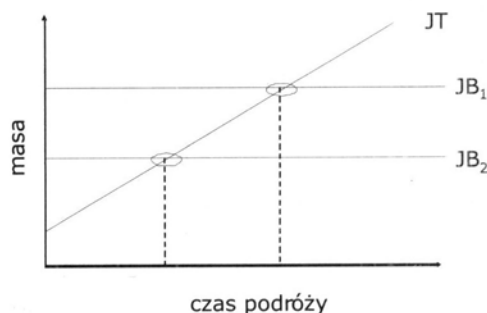
Rośliny umożliwią obieg materii na stacji kosmicznej, obniżając koszt jej eksploatacji. Ludzie zużywają tlen i wydychają dwutlenek węgla podczas oddychania, a rośliny wydzielają tlen i pobierają dwutlenek węgla w procesie fotosyntezy. Ludzie zjadają żywność i wydają produkty odpadowe z moczem oraz kałem, a rośliny wytwarzają żywność dla człowieka z dwutlenku węgla, wody, światła oraz ludzkich produktów odpadowych przetworzonych w nawóz. Wreszcie ludzie muszą pić wodę i wydalać mocz, a rośliny pobierają wodę uzyskaną po jego destylacji i wyparowują ją w czystej postaci.

Podsumujmy korzyści z uprawy roślin na stacjach kosmicznych. Będą to:

- odzyskiwanie tlenu zużytego przez jej mieszkańców (nie trzeba go pozyskiwać z rozkładu zabranej z Ziemi wody ani transportować z Ziemi w postaci czystej),
- asymilacja wydychanego przez ludzi CO_2 , (nie trzeba go wiązać przez zabrane z Ziemi absorbenty),
- przetwarzanie dwutlenku węgla w produkty spożywcze (nie trzeba zabierać z Ziemi dużych zapasów żywności),
- odzyskiwanie wody odpadowej, którą zamiast destylować i ponownie pić, co może być niemiłe, można podlewać rośliny i odzyskiwać ją z ich transpiracji,
- przetwarzanie wydaliny ludzkiej w nawóz dla roślin, które przetworzą go w pokarm dla ludzi.

Aspekty powyższe są tak ważne, ponieważ wysłanie każdego kilograma masy na orbitę pozaziemską kosztuje obecnie kilkanaście do kilkudziesięciu tysięcy dolarów.

Wprowadźmy wskaźnik określający opłacalność uprawy roślin na stacji kosmicznej. Nazwijmy go „jednostką biologiczną masy podtrzymującej życie” (w skrócie JB). Jest to masa materii koniecznej dla wyżywienia jednego mieszkańca stacji przez cały okres podróży. W jej skład wchodzi masa nasion, gleby, instalacji oświetlenia i klimatyzacji oraz urządzeń do utylizacji ludzkich produktów przemiany materii w postać przyswajalną dla roślin. Weźmy też pod uwagę inną jednostkę, nazwijmy ją „jednostką masy technicznej” (JT), którą stanowi suma masy brutto żywności, tlenu i absorbentów dwutlenku węgla, zapewniająca przeżycie jednego kosmonauty przez cały okres podróży. Obie zaproponowane przez nas jednostki wykazują istotną różnicę. Wielkość JB jest stała w czasie, natomiast wielkość JT rośnie proporcjonalnie do czasu podróży. Oznacza to, że dla dowolnych wartości obydwu jednostek, wykresy ich zależności od czasu muszą się przecinać (Rys. 1). Dla każdej wartości początkowej JT i JB istnieje więc graniczna długość wyprawy, powyżej której „recykling” materii przy użyciu roślin staje się bardziej opłacalny, aniżeli zabieranie z Ziemi gotowych produktów. Im mniejsza będzie wartość JB, tym krótsze podróże będą tańsze przy wykorzystaniu roślin do obiegu materii wewnątrz



Rys. 1. Zależność pomiędzy czasem podróży a masą ładunku zabieranego przez kosmonautów dla podtrzymania ich życia. JT – jednostka techniczna, JB₁, JB₂ – jednostki biologiczne (objaśnienia w tekście).

Fig. 1. Relationship between journey time and load mass taken by astronauts to support their life in the space. JT – technical unit, JB₁, JB₂ – biological units (for explanation see text).

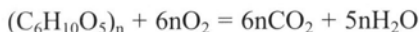
stacji. Początkowo głównym polem zastosowań będą stacje naukowe lub wielkie elektrownie słoneczne krążące na orbicie okołoziemskiej. Tu wprowadzić kosmonauci będą się zmieniać, ale w każdym momencie na stacji przebywać będzie określona ich liczba i będzie to trwało nawet wiele lat. Stan ten można więc porównać z wyprawą do odległych planet układu słonecznego.

Przedstawimy teraz wyniki obliczeń, które pokazują wielkość masy technicznej, zapewniającej podtrzymanie życia ludzi w podróży kosmicznej. Przyjmijmy, że na stację zabieramy najefektywniejszy chemiczny absorbent dwutlenku węgla – tlenek litu. Z dwutlenkiem węgla daje on węglan litu:



Oznacza to, że 30 g tlenu litu może zaabsorbować 44 g dwutlenku węgla.

Tkankowe utlenianie cukrów, na przykładzie skrobi, przebiega następująco:



Kosmonauta zatem, zjadając 162 g skrobi potrzebuje do jej utlenienia 192 g tlenu, a wydzieli 264 g dwutlenku węgla i 90 g wody. Tlen będzie uzyskany z elektrolizy wody, której należy zużyć 216 g (właściwie tylko 126 g, bowiem reszta pochodzić będzie z utlenienia skrobi). Powstały wodór (24 g) będzie usuwany. Po podsumowaniu obydwu równań okazuje się, że utlenienie 162 g skrobi wymaga zużycia 126 g wody, wyrzucenia poza stację 24 g wodoru oraz zużycia 180 g absorbera dwutlenku węgla, faktycznie obecnie jeszcze tlen zabiera się w postaci czystej, a nie elektrolizuje z wody ze względu na duże koszty energetyczne, jednak w przyszłości w warunkach obfitego zaopatrzenia stacji w energię, ważniejsza stanie się minimalizacja zabieranej z Ziemi masy.

Przyjmijmy, że kosmonauta spożywa dziennie ok. 1000 g węglowodanów. Może to dużo, biorąc pod uwagę, że w stanie nieważkości wysiłek mięśni jest niewielki, kosmonauci muszą jednak intensywnie ćwiczyć, aby powstrzymać odpadanie kości i zanik mięśni, a praca na zewnątrz stacji to podobno wielki wysiłek.

Kosmonauta potrzebuje więc do utlenienia zjedzonej porcji węglowodanów 721 g wody oraz 1116 g absorbera dwutlenku węgla. Jeśli założyć nawet pełną regenerację wody, to każdego dnia kosmonauta potrzebuje prawie 3 kg ładunku zabieranego z Ziemi, co daje ponad tonę rocznie. Pomnóżmy to przez liczbę osób załogi i pomyślmy o tonach odpadków wyrzuconych w kosmos (albo sprowadzanych na Ziemię), w tym setki kilogramów kału, nawet, jeśli moc z po destylacji będzie wypijany ponownie.

Jakie rośliny mogłyby być uprawiane na stacji kosmicznej? Może glony (np. *Chlorella*), bo uprawiane w reaktorach, w kulturach wodnych, sprawniej wykorzystują energię słoneczną. Są one jednak nieprzyswajalne bez obróbki mechanicznej, a i tak dają jedynie „papkę pokarmową”, niepodobną do zwykłych produktów spożywczych. Z tego względu na stacji kosmicznej powinny znaleźć się zwykłe rośliny uprawne, dostarczające żywności do jakiej przywykli mieszkańcy Ziemi. Niebagatelne jest też to, że rośliny te wytworzono w wielu genotypach, a ich genom, fizjologia, wymagania klimatyczne i siedliskowe oraz rozwój znane są w szczególności, co powinno ułatwić ich dobór do uprawy. Hodowców czeka jednak wiele pracy, aby tu na Ziemi wyprodukować rośliny najlepiej sprawdzające się w warunkach mikrogravitacji.

Żywność dla kosmonautów powinna być urozmaicona i pełnowartościowa. Nie może więc składać się wyłącznie z roślin o jadalnych organach wegetatywnych, czyli z sałaty, szpinaku czy kapusty, gdyż są one zbyt ubogie w energię. Człowiek potrzebuje pokarmu, bogatego w wysokoenergetyczne białka, cukry i tłuszcze, którego najlepszym źródłem są nasiona. Na stacji powinno się zatem uprawiać głównie zboże, rośliny warzywne (może sałata), strączkowe (groch lub soja) oraz trochę ziół przyprawowych. Ze względu na zapotrzebowanie człowieka na aminokwasy egzogenne, dostarczane zwykle w nabiale i mięsie, soja byłaby jedną z najbardziej pożądanых roślin, mogących dostarczyć składników pokarmowych przewidzianych w diecie kosmonautów.

Rośliny te powinny charakteryzować się wy-

sokim udziałem jadalnej masy, czyli stosunkiem masy plonu do całkowitej masy roślin (łącznie z korzeniami), nazywanego współczynnikiem plonowania „HI” (z ang. *Harvest Index*). Wartość HI zależy głównie od długości łodygi lub źdźbła. Im krótsza jest roślina, tym wartość HI jest wyższa, ponieważ zmniejsza się masa łodygi. Główny składnik łodyg – celuloza, choć nie jest przyswajalna przez człowieka, ma taki sam skład chemiczny jak główny jadalny składnik ziarna – skrobia. Kluczowym problemem jest zatem, aby rośliny, zamiast odkładać asymilaty w łodydze, kierowały je do kłosa i ziaren. U starszych (wysokich) odmian pszenicy wartość HI nie przekracza 40%, u odmian krótkosłomych – około 50%, a jego graniczną wartość szacuje się na 60%. Być może nie zdajemy sobie sprawy z tego, jak wielki jest wysiłek roślin, aby wytworzyć potomstwo, zanim nie przeliczymy go na warunki ludzkie. Jeśli w roślinie nasiona, czyli zaczątki następnego pokolenia stanowią 60% jej masy, to tak jakby u kobiety o wadze, powiedzmy, 60 kg, płód miał ważyć ponad 36 kg. Granicy tej nie ustalają jednak biologiczne czynniki, ale względy technologiczne. Roślin uprawianych w polu nie można bowiem za bardzo skrócić, bo uniemożliwiłoby to zbiór za pomocą kombajnu. Natomiast na stacji kosmicznej rośliny będą zbierane ręcznie, lub przy pomocy robotów. Zebrane zostaną więc rośliny nawet o bardzo krótkich źdźbłach i o najwyższych wartościach HI. Obecność celulozy w pokarmie jest wprawdzie korzystna dla trawienia, ale w obecnych genotypach jej zawartość jest jeszcze za wysoka. Będzie się więc dążyć do uzyskania jeszcze większej wartości HI. Mamy nadzieję, że hodowla wsparta inżynierią genetyczną pozwoli otrzymać odmiany pszenicy, które w warunkach mikrogravitacji uzyskają tak wysoki udział jadalnej masy, że kłosa, a w przyszłości może nawet całe rośliny, będą dawać po zmieleniu mąkę o wystarczającej zawartości dietetycznego błonnika.

Jak to uczynić? Jedną z dróg jest wytworzenie nagiej pszenicy, na wzór nagiego owsa czy jęczmienia, których ziarno pozbawione jest okrywy nasiennej. Poza tym, należy do-

konać przeglądau będących na rynku odmian, wybierając te o genetycznie wysokiej wartości współczynnika plonowania. Większe możliwości dałoby zbadanie materiałów hodowlanych, zwłaszcza tych odrzucanych ze względu na zbyt krótkie źdźbło lub za wczesne plonowanie. Genotypy te należałoby poddać selekcji, a następnie przekrzyżować dla spotęgowania poszukiwanych cech.

Grawitacja z jednej strony umożliwia zjawisko geotropizmu, czyli kierunkowego wzrostu roślin, z drugiej jednak strony, wywołując efekt ciężaru poszczególnych organów, indukuje w nich rozrost tkanek wzmacniających, których zadaniem jest zabezpieczenie roślin przed łamaniem się. Widzimy zatem, że zarówno brak, jak i zbyt silne efekty grawitacyjne są niekorzystne.

Na stacji kosmicznej trzeba będzie symulować mikrogravitację przez ruch obrotowy modułu „rolniczego”. Na szczęście pędy i korzenie roślin wykazują geotropizm już przy, odpowiednio, 10^{-3} i 10^{-4} ziemskiego ciężarzenia. Jeśli przyjąć, że moduł rolniczy miałby promień 5 m, wówczas wprowadzenie go w ruch obrotowy z częstotliwością 1 obrót na ok. 2,5 minuty zapewniłby przy jego zewnętrznych ścianach wartość siły odśrodkowej równą 0,001 ziemskiego ciężarzenia.

Na Ziemi nie można uniknąć grawitacji, a jedynie pozornie ją zmniejszyć poprzez dodanie siły skierowanej do góry, np. siły wyporu, co jednak odpada przy uprawie roślin lądowych. Można więc jedynie stworzyć warunki powstrzymujące grubienie ścian komórkowych i rozrost tkanek mechanicznych. Uzyska się to poprzez redukcję naprężeń mechanicznych w łodygach, ogonkach liściowych i liściach, powodowanych siłą ciężkości i wiatrem. W tym celu można uprawiać rośliny na drutach lub siatkach, które podprą liście, owoce i kłosa tak, by nie obciążały łodygi. Dzięki temu będzie ona cieńsza, o słabiej wykształconych celulozowych włóknach. Można też ograniczyć ruchy powietrza, albowiem wiatr tarosząc roślinami także stymuluje rozrost tkanek mechanicznych. Zapobiega to łamaniu się łodyg, ale zwiększa ich wysycenie celulozą. Wiatr umożliwia jednak pobieranie dwutlenku

węgla i oddawanie tlenu. Jego brak powoduje powstawanie wokół liści warstwy powietrza ubogiej w dwutlenek węgla, co w szklarniach pełnych roślin wywołuje głód dwutlenku węgla. Sposobem na „ulżenie” lodygom i zapewnienie roślinom wymiany gazowej jest wytworzenie ciągu powietrza od gleby pionowo w górę. Taki ruch powietrza zmniejszałby pozorny ciężar nadziemnych części roślin. Także właściwe mineralne żywienie roślin, a więc mniejsza zawartość wapnia i krzemionki w pożywce, przy zwiększonej zawartości potasu, azotu i fosforu, zmniejsza rozwój tkanek mechanicznych. Innym sposobem byłoby utrzymanie relatywnie wysokiej wilgotności powietrza oraz komfortu wodnego w glebie. Większa wilgotność powietrza spowalnia rozwój ochronnej kutyki na powierzchni liści, a optymalna wilgotność gleby spowalnia wzrost korzeni, zmniejszając udział ich masy w masie całej rośliny.

Wzrost wartości współczynnika plonowania można osiągnąć optymalizując architekturę rośliny i przerzucając większą część fotosyntezy na lodygę, kłos lub jego elementy (ości i plewy) oraz wąsy, przylistki i owoce. Organy te nie prowadzą tak efektywnej fotosyntezy jak liście, jednak asymilują CO_2 pochodzący z oddychania, skracając drogę asymilatów do organów spichrzowych.

Istnieją także rezerwy tkwiące w liściach. Zmniejszenie ich powierzchni pozwala zwiększyć zagęszczenie roślin i uzyskać większy plon z jednostki powierzchni uprawy. Powierzchnię liści można ograniczyć poprzez hodowlę, np. wąsko- czy wąsolistnych odmian grochu czy łubinu, a u innych roślin poprzez usuwanie nadmiaru liści. Jeśli usuniemy młode liście, które nie będą zawierały substancji szkodliwych dla ludzi, można by je spożywać jak warzywa. Liście pozostawione na roślinie zostaną „zmuszone” do intensywniejszej fotosyntezy.

Zwiększenie plonu z jednostki powierzchni uprawy uzyskuje się też skracając cykl rozwojowy roślin poprzez selekcję i krzyżowanie genotypów szybko kwitnących. Innym sposobem może być krzyżowanie roślin uprawnych z pokrewnymi im gatunkami ze strefy polarnej, które

z racji przystosowania do klimatu polarnego są niskie i mają krótki cykl wegetacyjny. Wreszcie, można wykonać transformacje genetyczne, zastosować hormony roślinne lub zoptymalizować warunki wegetacji dla szybkiego kwitnienia i tworzenia nasion. Należałoby tu wziąć pod uwagę takie czynniki, jak temperatura, nawodnienie, żywienie mineralne, fotoperiod, natężenie i skład spektralny światła, stężenie CO_2 , gęstość siewu i termin zbioru.

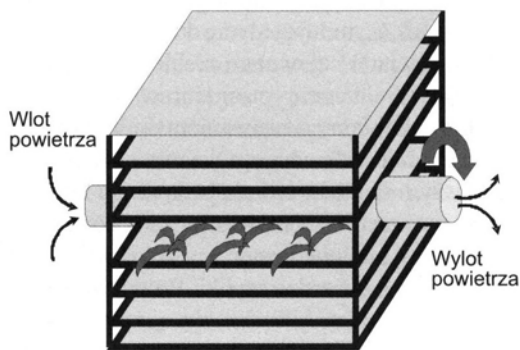
Niejadalną masę roślin można rozłożyć przy udziale grzybów (pieczarki lub inne gatunki), ślimaków, a nawet dżdżownic kalifornijskich. Grzyby i ślimaki są jadalne, a zmielone dżdżownice są podobno bardzo pożywne. Innym sposobem wykorzystania tej biomasy byłaby mineralizacja pozostałości po uprawie grzybów lub zwierząt, skroplenie pary wodnej i wykorzystanie składników mineralnych jako nawozu.

Nie powinno być problemów z optymalizacją innych czynników wegetacji, ponieważ w „bliskim kosmosie” jest pod dostatkiem promieniowania słonecznego, a temperatura „komfortu cieplnego” dla człowieka jest zbliżona do temperatury optymalnej dla wzrostu roślin uprawnych.

Jak zapewnić roślinom optymalne warunki świetlne? Początkowo sądziliśmy, że wykorzysta się bezpośrednie promieniowanie słoneczne. Rośliny jednak asymilują jedynie drobną jego część, głównie światło czerwone i niebieskie. Stąd też bezpośrednie użycie promieniowania słońca niesłoby problemy z usuwaniem nadmiaru ciepła z modułu rolniczego. Obecnie sądzimy, że najlepszym źródłem światła będą diody luminescencyjne, zasilane z fotoogniw zamocowanych na zewnątrz modułu. Postęp w wytwarzaniu diod świecących jest bardzo szybki. Produkowane są już diody o mocy kilkadziesiąt razy większej, aniżeli przed kilkoma laty. Można mieszać diody o różnym spektrum świetlnym tak, aby uzyskać światło o składzie optymalnym dla wzrostu i plonowania roślin. Jest tylko jeden problem przy optymalizacji składu widmowego światła diod: jeśli bowiem dopasujemy emisję diod do zdolności absorbcyjnych roślin, wówczas będą

one pochłaniać całe światło, w wyniku czego w różowo-fioletowym świetle powstającym ze zmieszania światła diod czerwonych i niebieskich, uprawiane rośliny staną się zupełnie czarne. Będzie to upiorny widok, jakże inny od wyglądu roślin, do którego przywykliśmy. Jest to jednak wyłącznie problem estetyczny. Można by zatem dodać trochę diod zielonych. Światło odbite od roślin nadałoby im bardziej „ziemski” kolor.

Zastosowanie diod luminescencyjnych, charakteryzujących się bardzo małymi wymiarami, pozwoli zbliżyć źródła światła do roślin i wypełnić moduł rolniczy jak ul pszczeli, gęsto upakowanymi półkami z roślinami, z własnymi panelami oświetlającymi (Rys. 2). Dla ułatwienia pielęgnacji czy zbioru roślin półki powinny być przesuwane, co pozwoliłoby utrzymywać między nimi odstęp produkcyjny krótszy niż 1 m. Lepszy byłby moduł rolniczy o kształcie prostopadłościanu aniżeli walca, ponieważ w prostopadłościanie powierzchnia półek na każdym poziomie byłaby taka sama. Przy takim kształcie modułu łodygi roślin odchylałyby się jednak od umownego pionu, ponieważ kierowałyby się ku środkowi modułu, a nie prostopadle do powierzchni półki. Odchylenie to byłoby największe przy ścianie modułu. Efekt ten da



Rys. 2. Schemat proponowanego modułu rolniczego w kształcie prostopadłościanu. Zaznaczono jedną z półek z roślinami, oraz wlot i wylot powietrza, będący jednocześnie osią obrotu modułu.

Fig. 2. Schema of proposed “agricultural” module of rectangular shape. One of shelves with plants, as well as inlet and outlet of air, being also the rotation axis of the module.

się jednak usunąć dzięki panelom diodowym o powierzchni równej półkom vegetacyjnym. Powstający wówczas efekt fototropizmu powinien wyprostować łodygi roślin. Z uwagi na niewielką grubość warstwy podłoża korzenie musiałyby rosnąć poziomo, dzięki czemu sięgałyby do wody odpływającej ku brzegom półki vegetacyjnej.

Jak duża powierzchnia uprawy może wyżywić jednego kosmonautę? Przyjeliśmy, że przy plonie pszenicy wynoszącym co najmniej 10 ton ziarna z hektara (1 kg z m^2) i przy uprawie roślin o krótkim cyklu vegetacyjnym – by uzyskać trzy zbiory w roku – na jednego kosmonautę powinno wystarczyć 100 m^2 uprawy. Dodać należałoby do tego masę grzybów i zwierząt wyhodowanych na resztkach poźniwnych zebranych z tej powierzchni. W module rolniczym w kształcie prostopadłościanu o wymiarach $10 \times 10 \times 20 \text{ m}$, powierzchnia jednej półki wynosi 200 m^2 . Przy odstępach między półkami równym 1 m w module zmieści się 10 półek. Łączna powierzchnia uprawy osiągnie więc 2000 m^2 , zapewniając wyżywienie 20-osobowej załogi. Kosmonauci mogą pełnić dyżury w module rolniczym albo, i tu jest perspektywa zatrudnienia dla absolwentów Akademii Rolniczej, jeden z członków załogi stanie się kosmicznym rolnikiem. Panele diodowe produkują też pewną ilość ciepła. Ciepło to można użyć do wyparowywania wody z roślin i gleby. Wilgotne powietrze pozbawione dwutlenku węgla, a wzbogacone w tlen, byłoby osuszane, a skroplona woda dostarczana kosmonautom i roślinom.

Długość foteriodu powinna być zoptymalizowana, aczkolwiek uprawiane będą raczej rośliny długiego dnia, kwitnące nawet przy ciągłym świetle. Ciągłe oświetlenie jednak bywa niekorzystne, gdyż nadmiar asymilatów nieodprowadzonych do organów spichrzowych, może uszkodzić chloroplasty. Stąd wydaje się celowe użycie światła pulsującego, które może być przez roślinę lepiej wykorzystane. Poszczególne półki z roślinami mogłyby być zasilane z fotoogniw umieszczonych po jednej stronie modułu. Nawiasem mówiąc, ostatnio wyprodukowano fotoogniwa o sprawności dochodzącej

do 40%, a więc prawie 3-krotnie większej niż dotychczas. W trakcie rotacji modułu ogniwa te otrzymywałyby pulsującą ilość promieniowania słonecznego. Przekładałoby się to na pulsujące światło diod. Rośliny miałyby więc co 2,5 minuty świt, dzień, zmierzch i noc.

Rośliny byłyby rozmnażane z nasion lub metodą *in vitro*. Produkcji nasion towarzyszyć będzie selekcja osobników najlepiej dostosowanych do warunków stacji kosmicznej. Będzie to kontynuacja ziemskiej hodowli. Trudno przewidzieć, jakie przyniesie ona efekty i jakie kształty uzyskają rośliny.

Jakie prace przygotowawcze można wykonać już teraz?

- Maksymalizację współczynnika plonowania z użyciem odmian lub materiałów ze stacji hodowli, co skróci czas badań na stacji kosmicznej i przyspieszy wprowadzenie tam roślin;

- Optymalizację mineralnego żywienia roślin, wpływu retardantów wzrostu na skracanie łodyg oraz fitohormonów hamujących starzenie liści i przyspieszających kwitnienie roślin;

- Minimalizację masy korzeni poprzez stworzenie komfortu wodnego w podłożu glebowym;

- Częściową defoliację roślin i możliwość większego ich zagęszczenia na powierzchni

uprawy dla zwiększenia plonu z jednostki powierzchni;

- Zwiększenie roli innych organów roślin w produkcji asymilatów;

- Optymalizację innych warunków wegetacji: temperatury (dla najkorzystniejszego podziału asymilatów pomiędzy organy wegetatywne i generatywne), natężenia i składu spektralnego światła, a także długości fotoperiodu, wreszcie terminu zbioru dla zmniejszenia stopnia zdrewnienia roślin;

- Opracować zasady ochrony roślin przed chorobami (zwłaszcza wirusowymi) w warunkach stacji kosmicznych lub zasady uzyskiwania roślin wolnych od wirusów.

W niniejszym artykule przedstawiliśmy problem wyżywienia człowieka w kosmosie jedynie w aspekcie uprawy roślin, zdając sobie oczywiście w pełni sprawę z tego, że w rozwiązaniu tego problemu muszą uczestniczyć również zootechnicy i dietetycy. Wierzimy, że rozwiązanie problemu uprawy roślin na stacjach kosmicznych stanowić będzie kolejny, po pierwszym sztucznym satelicie Ziemi, pierwszej wyprawie człowieka na Księżyc, czy pierwszej wyprawie na Marsa, milowy krok na drodze do podróży w głęboki kosmos.