S E S 2 0 2 6
Twenty-second International Scientific Conference
SPACE, ECOLOGY, SAFETY
20 – 24 October 2026, Stara Zagora, Bulgaria

РЕСУРСИ И ЕФЕКТИВНОСТ НА КОСМИЧЕСКИ ОРАНЖЕРИИ НА ПИЛОТИРУЕМИ КОСМИЧЕСКИ КОРАБИ

Павлин Граматиков

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: pgramatikov@space.bas.bg

Ключови думи: *космически оранжерии, енергийни ресурси, топлинни ресурси, водни ресурси, биорегенеративни системи за животоподдържане*

Резюме: *Изложени са резултати и параметри на космически оранжерии и биорегенеративни системи на САЩ, ЕКА, Китай и Русия. Разгледани са осветителни системи, разход на електроенергия, ефективност, електрически параметри.*

RESOURCES AND EFFICIENCY OF SPACE GREENHOUSES ON MANNED ORBITAL SPACECRAFT

Pavlin Gramatikov

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: pgramatikov@space.bas.bg e-mai

Keywords: *space greenhouses, energy resources, thermal resources, water resources, bioregenerative life-support systems*

Abstract: *The results and parameters of space greenhouses and bioregenerative systems from the USA, ESA, China, and Russia are presented. Lighting systems, power consumption, efficiency, and electrical parameters are examined.*

Въведение

Изхранването на екипаж в космически условия изисква повече от обикновено отглеждане на растения – необходима е и биорегенеративна система за животоподдържане (BLSS) [11]. Тя интегрира енергийната ефективност, топлинния баланс и водната регенерация в затворен цикъл.

В орбита около Земята естественият цикъл светлина-тъмнина е неподходящ за растенията (60 min светлина и 90 min тъмнина), слънчевата светлина е трудно да се улови и предаде ефективно вътре в космическата станцията и се разчита на изкуствено осветление, което е и най-големият консуматор на енергия на космическите оранжерии (КО).

Разход на електроенергия:

Съвременните КО използват LED технологии, които са сравнително енергоемки. Руската оранжерия „Витацикл-Т“ има размери 0,4 m², обем 0,09 m^3 и консумира около 870 W [1].

Прототипът EDEN ISS на Германския аерокосмически център (DLR) консумира приблизително 10 kW електроенергия [5].

Ефективност*:*

При висшите растения преобразуването на енергията на светлината в енергия на хранителните вещества има КПД от порядъка на 0,1% [2].

Спектралното разпределение на енергията и коефициентът на преобразуване на електрическата в светлинна енергия на светлинния източник са важни фактори за оценка на ефективността на осветителната система [3]. Спектралното разпределение на енергията на светлинния източник е важно в два аспекта: фотосинтеза и фотоморфогенеза. Фотосинтезата

се влияе основно от плътността на фотосинтетичния фотонен поток с диапазон 400–700 nm. Фотоморфогенезата и морфологията се влияят от спектъра в диапазона от 300–800 nm. Коефициентите на преобразуване на типичните натриеви и флуоресцентни лампи с високо налягане са съответно около 0,38 и 0,26. Коефициентът на преобразуване на съвременните LED лампи е около 0,40, който ще бъде подобрен през следващите години [3].

Алтернативни концепции:

Съществува идея за „слънчеви биопанели“, при които едноклетъчните водорасли (хлорела) [9] абсорбират слънчевата светлина директно извън космическия кораб. Този метод драстично повишава ефективността до 10% (сравнимо със слънчевите панели) и значително намалява нуждата от скъпоструваща вътре енергия.

Електрически и ресурсни параметри на космически оранжерии

КО изискват значителни електрически ресурси при поддържането на напълно контролирана среда – осветление, климатизация, циркулация на вода и хранителни разтвори, мониторинг и автоматизация.

EDEN ISS – земен изпитателен стенд за КО

Данните от реални мисии като EDEN ISS дават конкретна представа за електрическите параметри и ресурсни нужди на КО. Осветлението (LED системи) е най-големият консуматор на енергия. В EDEN ISS е измерена консумация на отделни LED модули при различни нива на осветеност, което позволява изчисляване на общата мощност за фотосинтетично активна радиация (ФАР). Атмосферното управление (AMS) служи за регулиране на CO_2, кислород, температура и влажност. Термалният контрол (TCS) служи за отопление, охлаждане и отвеждане на топлина от осветителни и електронни системи. Системата за хранителни разтвори (NDS), отговаря за помпи, циркулация на вода, поддържане на pH и електропроводимост. Системата за мониторинг и управление (CDHS) се състои от сензори, камери, телеметрия, дистанционно управление. EDEN ISS използва телеметрична система с контролен център. Разпределението на енергията (PDS) включва стабилизатори, преобразуватели, резервирани линии за критични системи [5, 6]. Потреблението на електроенергия е 6600–7800 KWh на месец. Общата мощност от февруари до ноември 2018 г. е около 68 516 KWh, което съответства на 5481 KWh/m^2 от обработваемата площ. По време на фотопериода LED са включени, освен тъмния период от 7 часа. Средната консумация през фотопериода е 11,23 KWh, а през тъмния период е 8,21 KWh. В 00:00 часа LED се включват с понижена интензивност. За един час LED напълно се включват в периода на който е запланиран обичайния нощен ритъм на работа на космонавтите. В 08:00 часа LED се включват на „разсвет“ с намалена интензивност. В 09:00 часа LED се превключват на нормално ниво на интензивност до 23:59. Част от електрическата енергия, използвана от LED, се преобразува в топлина, която нагрява въздуха вътре във FEG (Future Exploration Greenhouse), а FEG отдава топлина в околната среда. AMS е оборудван с нагреватели за подгряване на атмосферата на FEG. Освен подсистемите за управление на атмосферата и подсистемите за терморегулация, подсистемата за осветление също има висока потребност от електроенергия – 28% от общата енергия MKS EDEN. Младите растения обикновено получават по-малко светлина в сравнение с напълно зрелите растения. При сравняване SPFGC (South Pole Food Growth Chamber, оранжерия на американската станция на Южния полюс) има 9,5 KWh/m^2 за 24 h, а EDEN ISS – 5,7 KWh/m^2 за 24 h енергия за осветителни тела или 60 %. За сезон 2018 година EDEN ISS произвежда 517 kg биомаса от 55 055 KWh, от които 268 kg са хранителни, или ~ 205 kWh електроенергия на килограм произведени продукти. Производителността на EDEN ISS за 2018 г. е 0,08 kg/m^2 за 24 h при засадени салатни и зеленчукови култури, а не бобови и зърнови.

Хидропоника и среда за отглеждане

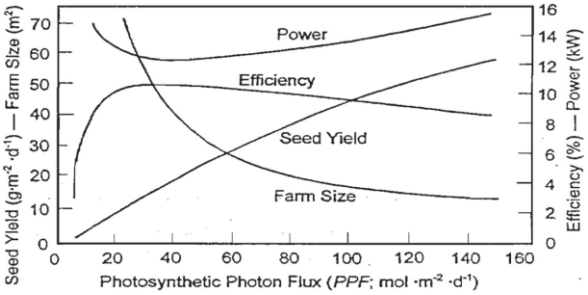
Без почва КО разчитат на хидропонни или аеропонни системи, за доставяне на вода и хранителни вещества директно до корените на растенията. Хранителните системи циркулират вода, обогатена с макро- и микроелементи, контролирана за поддържане на желано pH и електрическа проводимост. Пулверизатори разпръскват фини капчици, като подобряват газообмена и намаляват потреблението на вода до 90%, в сравнение с наземното земеделие. Интегрирани сензори измерват съдържанието на влага, концентрациите на хранителни вещества и кислород на кореновата зона в реално време за да предотвратят липси и да осигурят автоматични корекции [3]. Изискванията на околната среда на растенията се различават в сравнение с изискванията на екипажа. Например, оптималното парциално налягане на CO_2 за растеж на растенията е приблизително 0.10 до 0.20 kPa (Wheeler, et al., 1993); под това продуктивността намалява. Чувствителността към CO_2 може да варира при различните видове, но растенията имат намалена продуктивност при много високо парциално налягане на CO_2, което

се счита за нормално за екипажа (около 1.0 kPa). Растенията се нуждаят от по-висока относителна влажност (75%) за да избегнат воден стрес и да минимизират използването на хранителни вещества, но тя е най-високо ниво за комфорт на екипажа [12].

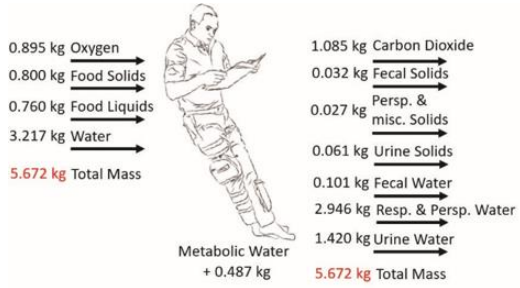
Оптимизиране на осветлението и фотосинтезата

Изкуственото осветление допълва или замества естествената слънчева светлина, когато пряката слънчева светлина не е налична. Високоефективните LED панели осигуряват фиксирани дължини на вълните – синя светлина за разширяване на листата и червена светлина за цъфтеж – за оптимизиране на скоростта на фотосинтеза. Контролира се интензитета на LED с цел намаляване на консумацията на енергия [4]. Светлоотразителите осигуряват равномерно разпределение на осветеността и минимизират зоните на сенките.

На фиг. 1 са дадени зависимости на четири показатели: „Ефективност“, означена с E (%); „Добив на семена“ е среден добив на семена на m² на ден [g.m^{-2} d^{-1}]; „Мощност“ е мощността за осветление [kW] и „Размер на фермата“ [m^2] е площта на посевите, нужни за осигуряване на количеството зърно за дневната хранителна дажба на един член от екипажа. Дневният интегриран поток на фотони е обозначен като PPF (photosynthetic photon flux, [mol m^{-2} d^{-1}]) [4].



Фиг. 1. Зависимости на фотосинтетичната продуктивност на пшеницата от дневния PPF [4]



Фиг. 2. Дневен масов баланс на астронавт с тегло 82 kg [11]

Съвременните космически фотоволтаици преобразуват по-широк спектър от слънчева светлина в електричество и имат ефективност на преобразуване над 30%, повече от типичните земни фотоволтаици. За да поддържат оптимални ъгли на падане, космическите фотоволтаици може да използват едноосни или двуосни тракери. Непрекъснато захранване е нужно за КО, дори по време на затъмнения или планетарни нощи. Системите за съхранение на енергия комбинират акумулаторни батерии с висока енергийна плътност и суперкондензатори за бързо разреждане по време на пикови натоварвания. На борда регулатори на напрежението и устройства за управление на захранването разпределят електрическата енергия към системите за животоподдържане, осветление, термичен контрол и циркулация на водата.

Биорегенеративни животоподдържащи системи

Биорегенеративната животоподдържаща система използва живи организми, за да преобразува отпадъците в използваеми ресурси. Растенията играят централна роля в тази затворена екосистема, превръщат въглеродния диоксид в кислород чрез фотосинтеза, произвеждат ядлива биомаса и пречистват водата. Тези системи целят да създадат затворена среда, където входящите и изходящите ресурси остават балансирани по време на дълги мисии.

В космическата кабина под налягане екипажът постоянно издишва въглероден диоксид (CO_2) и отделя влага, а без регенерация, нивата на CO_2 бързо стават токсични, виж на фиг. 2 дневния масов баланс на астронавт с тегло 82 kg, който се използва при разчет на BLSS [11]. Растенията решават тези проблеми чрез: абсорбиране на CO_2 и отделяне на O_2 под въздействието на светлина; емитиране на водна пара (която може да се събира и кондензира); абсорбиране на летливи органични съединения през устицата на листата и създаване на ядлива биомаса. Използването на водораслите във фотобиореактори подобрява газообмена в космическата кабина. Микроводорасли като хлорела могат бързо да поглъщат CO_2 при оптимални условия на светлина и хранителни вещества [9]. Хлорелата е инструмент за поддържане на атмосферния баланс.

Осветителни системи и спектрална оптимизация

Ключов параметър за растежа на растенията е осветлението, а ефективността на електрическото осветление зависи от ефективността на преобразуването на електричеството в радиационна енергия и посоката на тази енергия към растението [10]. Ефективността на преобразуване зависи от типа на осветителното тяло. Много фактори влияят върху фотосинтетичното активно излъчване (PAR). Фотосинтетичният фотонни поток (PPF) е друг начин за изразяване на PAR, но чрез квантови единици, като [μmol/(m²·s)], вместо [W/m²] [11]. Камерата за производство на биомаса (BPC) в Космическия център Кенеди използва

нестандартни рефлектори и постига рейтинг около 10–15% (Wheeler, 2017). Фотосинтезата и растежът на растенията се определят от молове фотони. Затова е важно да се сравнява ефективността на светлината въз основа на ефективността на фотоните с единици микромоли фотосинтетични фотони на джаул входна енергия. Това е особено важно при LED диодите, където най-ефективните диапазони са в дълбоките червени и сини дължини на вълната [11].

За системата за растеж на зеленчукови растения на МКС, общата ефективност на светлинните източници е около 40% при максимална светлина (Bourget, M, 2014). Индивидуалната ефективност на LED е различна за съответните цветове: за червен 34,5%; за син 69% и за зелен 24,5% [11]. Осветителните LED панели са адаптирани за растежа на растенията и излъчват ленти, насочени към пиковете на абсорбция на хлорофил. Чрез регулиране на съотношението на синя и червена светлина се контролират морфологията, времето на цъфтеж и добива на култури. Графиците за затъмняване и осветяване имитират циклите ден-нощ за да поддържат циркадните ритми и да подобрят стреса на растенията.

Космически оранжерии на САЩ

NASA и университети на САЩ активно разработват затворени системи за дълбокия космос. Системата URRM (Utah Reusable Root Module) е модул с автоматизирана система за фертигация (напояване и торене), която поддържа повторната употреба на заместител на почвата. По време на наземни тестове системата е произвела над 1 kg прясна биомаса (Mizuna) за 17 дни, демонстрирайки висока ефективност на използване на водата – над 2 g биомаса на литър [7, 8]. На борда на Международната космическа станция (МКС) е успешно проведено отглеждане на растения при експерименти на NASA (това са КО Veggie и Advanced Plant Habitat, в които са засадени маруля, цинии и други култури). След редица експерименти са уточнени перспективните растения за КО, виж Таблица 1 [11].

Китайска космически оранжерии и биорегенеративни системи

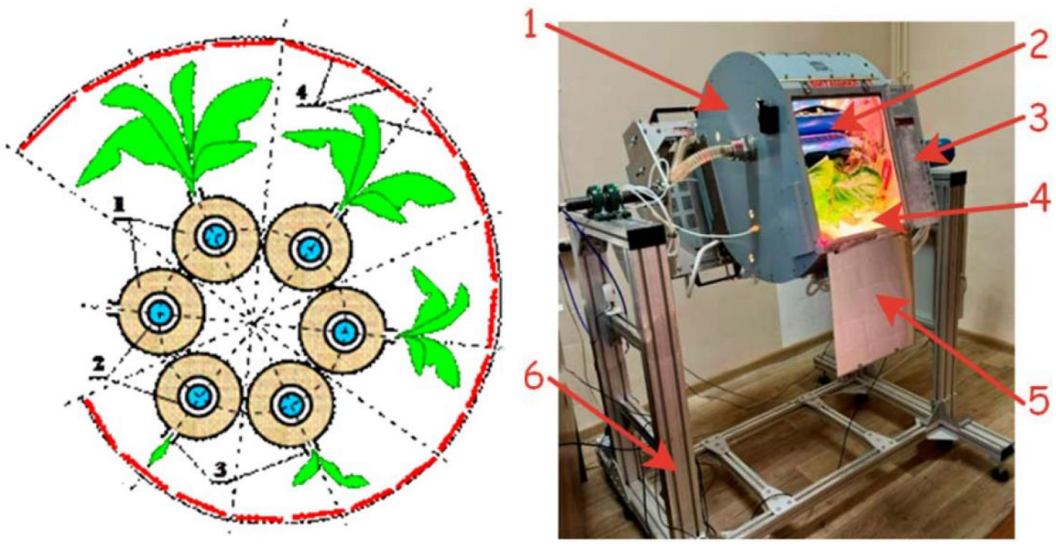
Китай постига значителен напредък в развитието на КО при експерименти в своята орбитална станция. В китайската орбитална космическа станция „Тянгун“ (Небесен дворец) редовно се отглеждат растения с два типа установки – едната използва субстрат, а другата аеропоника. От 2016 г. китайските астронавти отглеждат маруля, ориз, домати, жито, лук, сладки картофи, салати, домати джудже, зелен лук, листна култура Gynura bicolor и други. През 2022 г. за първи път в света е завършен пълен жизнен цикъл на ориз в космоса, от семе до семе. През 2025–2026 г. са въведени хидропонни и аеропонни системи, които пръскат вода под формата на мъгла, за да я пестят ефективно. През 2026 г. започва експеримент за проследяване на наследствеността на ориза в две поредни поколения в орбита. В пустинята Бадайн Джаран (близо до центъра за изстрелване на сателити Дзиуцюен) има високотехнологична вертикална оранжерия, където се използва хидропоника, LED осветление и интелигентни системи за контрол на климата и се симулират условия, близки до тези в космоса. Към септември 2026 г. Китай съобщава, че е отгледал в космоса над 20 разновидности от 14 растителни вида, сред които маруля, морков, слънчоглед, картоф и пшеница. Важна предистория е китайският експеримент Lunar Palace 1 в Пекин. В затворен комплекс с обем около 500 m^3 трима участници живеят 105 дни и отглеждат царевица, фъстъци, леща и краставици. Част от биологичните отпадъци се преработват за повторно използване при отглеждането на растения.

Руска космическа оранжерия

Руските изследвания са фокусирани върху разработване и тестване на конвейерна автоматизираната оранжерия Vitacycle-T за руския сегмент на МКС, фиг. 3. В схемата от фиг. 3 обозначенията са: 1 – цилиндри на модулите за корените; 2 – пористи тръби (тензиометри); 3 – отверстия за посаждане и 4 – панели на LED. На външния вид от Фиг. 3 обозначенията са: 1 – външен корпус вегетационния модул; 2 – модул за корените; 3 – блок управление и регистрация; 4 – панели на LED; 5 – люк за достъп и 6 – наземен изпитателен стенд. Тази КО е проектирана за конвейерно отглеждане на листни зеленчуци (като китайско зеле) за допълване на диетата на космонавтите с витамини. Капацитетът на руската КО се оценява на 84 g зелена маса на ден, което е достатъчно, за да осигури на един член от екипажа витамини А и С.

Таблица 1. Растения за поддържане на живота, предназначение и условия за растеж [11]

Реколта	ELS Транспорт Crop	ELS Повърхност Crop	Фотосинтеза Поток от фотони [mol/(m²•d)]	Дневен режим ФотоПериод [h/d]	Растеж Точка [dAP]	Температури [C]		
						Въздух по време на ден	Въздух по време на нощ	Хранителен разтвор
Зеле	u	u	28 (2)		85 (4)	>25		
Морков	u	u	28 (2)		75 (4)	16-18		
Chard	u	u	17 (2)	16	45 (3)	23	23	23
Целина			17 (2)		75 (4)			
Сух боб		u	24 (3)	18	85 (5)	28	24	26
Зелен лук			26 (6)		50 (5)	25	25	25
Маруля	u	u	17 (3)	16	28 (3)	23	23	23
Гъби			0	0				
Лук	u	u	17		50			
Грах			24 (2)		75 (4)			
Фъстъци		u	27 (3)	12	104 (3)	26	22	24
Pepper			27 (2)		85 (5)			
Репичка	u	u	26 (6)	16	25 (4)	23	23	23
Червено цвекло			17 (3)	16	40 (3, 7)	23	23	23
Ориз		u	33 (3)	12	85 (3)	28	24	24
Snap Bean			24 (2)	18	85 (5)	28	24	26
Соя		u	28 (3)	12	97 (3)	26	22	24
Спанак	u	u	17 (3)	16	30 (4)	23	23	23
Ягода			22 (3)	12	100 (4)	20	16	18
Сладък картоф		u	28 (3)	12	85 (5)	26	22	24
Домат	u	u	27 (3)	12	85 (3)	24	24	24
Пшеница		u	115 (4)	20-24	75-90 (3)	20	20	18
Бял картоф		u	28 (3)	12	132 (8)	20	16	18



Фиг. 3. Схема и външен вид на конвейерна космическа оранжерия Vitacycle-T [1]

Бъдещи проекти

Текущ проект на ESA Space Solutions е TRANSFORM. Той обединява автоматизирана, модулна оранжерия с фотобиореактор с микроводорасли за пречистване на отпадъчна вода и възстановяване на хранителни вещества. TRANSFORM се води като feasibility study–ESA описва проекта като концептуална и доказваща осъществимост, а не като готова космическа оранжерия, предназначена за изстрелване [12].

Заключение

Системата за контрол на околната среда и поддръжка на живота (ECLSS), осигурява кислород, вода, храна и други незаменими ресурси на екипажа в космически условия. Възстановяването на кислород и вода от ECLSS в МКС достига съответно 47% и 93%, докато тези на Земята могат да бъдат по-високи, отчасти благодарение на въвеждането на растения. Бъдещите космически станции планират да разширят оранжерийните модули и да подобрят биорегенеративните системи за животоподдържане за да се намали зависимостта от снабдяване и да се подобри безопасността и гъвкавостта на мисиите.

Литература:

1. Беркович, Ю. А., Беляк, А. М., Буряк, А. А., Смирнов, Ю. И., & Иванова, А. А. (2025). Витаминная космическая оранжерея как элемент перспективной биолого-технической системы жизнеобеспечения космических экипажей. *VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, *24*(2), pp. 7–18. DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-2-7-18 https://journals.ssau.ru/vestnik/article/viewFile/28690/11321
2. Ребеко, А. Г. (2016). Солнечные биопанели как основа системы жизнеобеспечения космических аппаратов. Идеи КЭ Циолковского в инновациях науки и техники, pp. 183–184. https://readings.gmik.ru/lecture/2016-SOLNECHNIE-BIOPANELI-KAK-OSNOVA-SISTEMI-ZHIZNEOBESPECHENIYA-KOSMICHESKIH-APPARATOV
3. Kozai, Toyoki. Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: Concept, estimation and application to plant factory. *Proceedings of the Japan Academy, Series B* 89.10 (2013), pp. 447–461. https://doi.org/10.2183/pjab.89.447 https://www.jstage.jst.go.jp/article/pjab/89/10/89_PJA8910B-01/_pdf
4. Berkovich, Y.A., Buryak, A.A., Ochkov, O.A., Smolyanina, S.O. and Lapach, S.N., 2022. Minimization of the equivalent system mass of a vitamin greenhouse with LED lighting for various scenarios of space missions. *Acta Astronautica*, *198*, pp. 403–409. DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.05.003 https://pdf.sciencedirectassets.com/271447/1-s2.0-S0094576522X00076/1-s2.0-S0094576522001990/main.pdf
5. Zabel, P., Vrakking, V., Zeidler, C., & Schubert, D. (2022, July). Energy and power demand of food production in space based on results of the EDEN ISS Antarctic greenhouse. 51st International Conference on Environmental Systems, pp. 1–11. https://ttu-ir.tdl.org/server/api/core/bitstreams/24ba23b0-baa5-4792-82e1-2b6a2c7b5f3c/content
6. Zeidler, C., Vrakking, V., Bamsey, M., Poulet, L., Zabel, P., Schubert, D., ... & Domurath, N. (2017). Greenhouse module for space system: a lunar greenhouse design. Open Agriculture, 2(1), pp. 116–132. DOI: 10.1515/opag-2017-0011 https://hal.science/hal-03916760v1/file/%5B2017%5D%20Zeidler%20Greenhouse%20Module%20for%20Space%20System%20A%20Lunar%20Greenhouse%20Design.pdf
7. Gioia Massa, Trent Smith, 2nd International Workshop on Space Agriculture and Horticulture, Chiba,16–18 March 2026, https://ntrs.nasa.gov/citations/20260002161 https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20260002161/downloads/GMASSA%20TSMITH%20Chiba%202026.pptx
8. Gioia Massa, Raymond Wheeler, Matthew Mickens, Trent Smith, Meeting: 2nd GNU Space Bio International Symposium, Gyeongsang National University, January 12, 2026, NASA Technical Management https://ntrs.nasa.gov/citations/20260000312 https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20260000312/downloads/GMassa%202nd%20GNU%20symposium.pptx
9. Gramatikov, P., Totorov, R., Hotinov, B., Karadjov, J. Biotechnology module for space biological life support systems. Association Scientific and Applied Research, Konstantin Preslavsky University Press, 15, JOURNAL SCIENTIFIC AND APPLIED RESEARCH, 2019, ISSN:1314-6289, pp. 22–30. DOI: 10.46687/jsar.v15i1.251 https://rst-tto.com/rsttakt/images/vol_15.pdf#page=23
10. Gramaticov, Pavlin; Ivanova, Tania, SVET-2 Space Greenhouse Light Unit, Aerospace Research in Bulgaria (ISSN 0861-1432), No. 16, (2001), pp. 24–34. http://adsabs.harvard.edu/abs/2001ARBl...16...24G
11. Ewert, Michael K., Thomas T. Chen, and Camilah D. Powell. "Life support baseline values and assumptions document." (2022), pp. 1–200. https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210024855/downloads/BVAD_2.15.22-final.pdf
12. https://business.esa.int/projects/transform