

**РАСТЕЖ НА РАСТЕНИЯ В КОСМИЧЕСКА ОРАНЖЕРИЯ “СВЕТ” ПРИ
ФЛУОРЕСЦЕНТНИ И СВЕТОДИОДНИ ИЗТОЧНИЦИ НА СВЕТЛИНА****Йордан Найденов, Таня Иванова, Илиана Илиева***Институт за космически изследвания – Българска академия на науките
e-mail: yordan.naydenov@space.bas.bg*

Резюме: Характеристиките на изкуственото осветление са от първостепенно значение за растежа и развитието на растенията отглеждани в техногенни среди, каквито са Космическите оранжерии (КО). При това, намирането на оптималните светлинни условия за дадено растение се затруднява и от различните му изисквания към параметрите на светлината през отделните фази на индивидуалното развитие. При разработката на осветителните блокове в КО досега са използвани предимно флуоресцентни лампи, но в последните години широко приложение намират светодиодите, които освен многото си предимства, позволяват и динамично управление на осветлението. Проведени бяха четири едномесечни експеримента с цел изследване влиянието на различните светлинни източници върху растежа на салатни култури в лабораторния образец на летялата на ОС МИР КО "СВЕТ-2". Два от експериментите бяха проведени с използвания досега Блок за осветление (БО) на флуоресцентни лампи, поставен на две височини над посевната площ. Другите два експеримента бяха проведени с новоразработения лабораторен образец на БО на мощни светодиоди и спектрален състав на светлината 70% червена, 20% зелена и 10% синя, но при различни плътности на фотосинтетичния фотонен поток. Първоначалните резултати дават възможност да се сравни ефективността на двата способа за осветление и да се потърсят оптимални параметри на светлинните условия за растежа на салатните култури в ранните етапи на развитието им.

**PLANT GROWTH IN "SVET" SPACE GREENHOUSE UNDER FLUORESCENT
AND LIGHT-EMITTING DIODE LIGHT SOURCES****Yordan Naydenov, Tania Ivanova, Iliana Ilieva***Space Research Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: yordan.naydenov@space.bas.bg***Keywords:** SVET Space Greenhouse, Light Unit, Light-Emitting Diodes (LEDs), Fluorescent Lamps

Abstract: The artificial lighting's characteristics are of primary significance for the growth and development of plants cultivated in technogenic environments such as Space Greenhouses (SG). Finding optimal light conditions is difficult to be resolved due to the different and ever changing requirements of the particular plant species or even its varieties during their individual development (ontogeny). Fluorescent lamps have been used largely in the lighting modules of the SGs and now they are superseding by the light-emitting diodes (LEDs) which, among many other advantages over conventional lamps, allow light parameters' control in dynamics. Four one-month experiments were conducted in order to examine the effects of different light sources on the growth of salad plants cultivated in the laboratory model of the flown onboard MIR Space Station SVET-2 SG. The original SVET-2 fluorescent lamp Light Unit (LU) was used in two of the experiments. It was fixed at two positions above the sowing area. The rest two experiments employed then newly developed LU on high-power LEDs. The spectral composition maintained was 70% red, 20% green and 10% blue light but with different photosynthetic photon flux densities (PPFD). The initial results of the experimental data analyses enable to compare the two modes of lighting in terms of effectiveness and to search for optimal parameters of the lighting conditions needed for the growth of the salad cultures in the early stages of their development.

Въведение

Светлинната енергия от видимата област на електромагнитния спектър е от жизнена необходимост за фотоавтотрофните организми, каквито са основната част от висшите растения (изключение са безхлорофилните представители на паразитните, сапрофитните и

микохетеротрофните видове). В естествени условия тази енергия се набавя от достигналата до сухоземните или водни растения слънчева радиация. Параметрите ѝ, както и продължителността на светлинната част от денонощието, са важни фактори за растежа, развитието и размножаването на растенията. Чрез промени в параметрите може да се влияе положително или отрицателно на скоростта на растеж и степента на развитие на растителните организми, както и да се премине от период на вегетация към размножаване.

При разработката на осветителните блокове за Космическите оранжерии (КО) за провеждане на експерименти с висши растения в условия на безтегловност досега са използвани предимно флуоресцентни лампи. В създадената в Института за космически изследвания при БАН автоматизирана КО "СВЕТ", изстреляна на борда на Орбитална станция (ОС) МИР през 1990 г., първите успешни двумесечни експерименти със зеленчукови растения бяха проведени с руски луминисцентни лампи тип LS 8-6 [1]. През 1996 г. с финансиране от NASA, бе разработена нова модификация на оранжерията – КО "СВЕТ-2", с оптимизирани параметри на всички блокове и системи, включително и нов Блок за осветление (БО) с флуоресцентни лампи тип OSRAM DS 11/21 [2].

Оптимизираните параметри на новия БО позволиха нормалната му работа на борда с много по-добра светлинна интензивност, което увеличи значително възможността за натрупване на биомаса в растенията. В летателния образец на КО "СВЕТ-2" през 1996-99 г. успешно бяха проведени редица многомесечни експерименти с различни видове растения с цел осъществяване на пълен жизнен цикъл (от семена посадени на борда да се развият нормални растения и да узреят жизнеспособни семена) [3]. Получени са уникални научни резултати в областта на фундаменталната гравитационна биология – доказано е, че не съществуват непреодолими препятствия за развитието на растенията в безтегловност, стига да бъдат осигурени необходимите култивационни условия.

Традиционните източници на осветление – флуоресцентните лампи, не позволяват динамично управление на параметрите на генерираната от тях светлина и по-специално на спектралния ѝ състав. Такова управление може да бъде постигнато с използване на комбинация от монохроматични светлина-излъчващи диоди (светодиоди; Light-Emitting Diodes, LEDs). Това са твърдотелни източници на светлина, работещи на сравнително нов за осветителната техника принцип. Техните основни предимства пред конвенционалните източници са: дълъг експлоатационен живот; голям светлинен добив; стабилен светлинен поток; висока надеждност и ефективност при работа в тежки експлоатационни условия; те са енергоспестяващи и с висок КПД; лесно се реализира регулиране на светлинния поток (димирание); имат широк работен температурен диапазон. Това ги прави особено пригодни за използване в космическите оранжерийни установки, в които растенията се отглеждат в условия на микрогравитация и в една изцяло техногенна среда. Това предполага наличие на силни и разнообразни стресови въздействия, за минимизиране действието на които е необходимо адекватно управление на всички жизненоважни параметри на вегетационната среда според физиологичното състояние и стадия на развитие на растенията.

С цел изследване влиянието на спектралния състав и количеството светлинна енергия върху кълняемостта и началните етапи на развитие на растенията, бяха проведени четири едномесечни експеримента по отглеждане на салатни култури в лабораторния образец на КО "СВЕТ-2", с използване на два Блока за осветление – на използвания досега на флуоресцентни лампи (БО_{ФЛ}) и на новоразработения на мощни светодиоди (БО_{СД}) [4]. За оценка влиянието на тези два параметъра на светлината върху растенията са използвани данни от измервания на морфологични и биохимични показатели, отчетени в края на експериментите.

Експериментална апаратура и материали

БО_{ФЛ} се движи вертикално в Камерата за отглеждане на растения (КОР) на КО "СВЕТ-2", като се фиксира на две различни нива от повърхността на Вегетационния съд: на 20 и 40 cm, така че да осигури различна осветеност на посевната повърхност при първите 2 експеримента. На горната му носеща плоча е монтиран вентилатор (тип PAPST) за охлаждане на лампите и повишаване на газообмена между КОР и външната среда. Управлението на БО_{ФЛ} се осъществява автоматично от специализираната микропроцесорна система на Блока за управление на КО, с помощта на която се следят и параметрите на средата в кореновата зона. Извършва се и наблюдение на въздушната среда (листна зона) от новоразработена за целта мониторингова система [5].

В БО_{ФЛ} са използвани 6 флуоресцентни лампи тип OSRAM DS 11/21 [6], а БО_{СД} – три типа светодиоди Cree® XLamp® 7090 XR, излъчващи монохроматична светлина в червената (620 – 635 nm), зелената (520 – 535 nm) и синята (465 – 475 nm) области на видимия спектър. Светодиодите са групирани в спотове – групи от три диода, по един от всеки вид, – а спотовете

са монтирани като матрица 6x6 по излъчвателната повърхност на Блока. Всеки спот е снабден с оптична система (лупа) за по-добро смесване и концентриране на трите снопа светлина. Такова обединение и разпределение позволяват равномерно осветяване на вегетационната повърхност (респ. листната покривка) с която и да е от светлините, независимо от процентното им участие в общия спектрален състав [7].

И при четирите експеримента едновременно бяха отглеждани два вида растения:

- листна салата (сорт “Лоло роса”) – *Lactuca sativa* L. var. *acephala* Dill. cv. Lollo Rossa;
- листна цикория (сорт “Бианка ди Милано”) – *Cichorium intybus* L. subsp. *intybus* (Foliosum Group) cv. Bianca di Milano.

Описание на експериментите

Експериментите по култивиране на салатни растения в лабораторния образец на КО “СВЕТ-2” са осъществени при строго зададени параметри на излъчваната от Блоковете светлина и в следния хронологичен ред:

- 1) **E5** (май - юни 2006 г.) – БО_{Фл} на **40 cm** от посевната повърхност; плътност на фотосинтетичния фотонен поток (Photosynthetic Photon Flux Density, PPFD¹): **120 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$** [8];
- 2) **E6** (юни - юли 2006 г.) – БО_{Фл} на **20 cm**; PPFD: **220 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$** [8];
- 3) **E8** (септември - октомври 2007 г.) – БО_{Сд} на **20 cm**; PPFD: **400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$** ; спектрален състав: 70% : 20% : 10% RGB (червено-зелено-синьо) [9];
- 4) **E9** (ноември - декември 2007 г.) – БО_{Сд} на **20 cm**; PPFD: **220 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$** ; спектрален състав: 70% : 20% : 10% RGB [9].

Експериментите са проведени в климатизирана лаборатория, с поддържане на температура 22°C и при дълъг ден (Long-Day Photoperiod, LDPP) от 16 часа ден и 8 часа нощ.

Култивацията в КО “СВЕТ-2” е основана на технологията на субстратната култура. Като хранителна среда е използван минерал зеолит с търговско наименование “Балканин”, обогатен допълнително с минерални соли и микроелементи. Фракцията на субстратните частици е 1.0 - 1.5 mm. Семената са засявани поредово в Кореновия Модул (KM) на КО на дълбочина 1 cm от субстратната повърхност (5 cm от хидропроводите), след изпълнение на подготвителна програма за първоначално овлажняване на субстрата от Блока за Управление (БУ) на КО.

Водният баланс в двете касети (респ. за двете култури) на KM е поддържан автоматично със зададен праг на влажност на субстрата, така че да се утилизира приблизително еднакво количество вода при всички вегетации. За напояване е използвана чешмяна вода, предварително очистена с препарата CFS-SOLVO[®], представляващ алуминиев хлорхидратен коагулант ($x\text{Al}_2\text{O}_3\cdot y\text{HCl}\cdot z\text{H}_2\text{O}$; $x = 1$, $y = 0.9$ до 1.2).

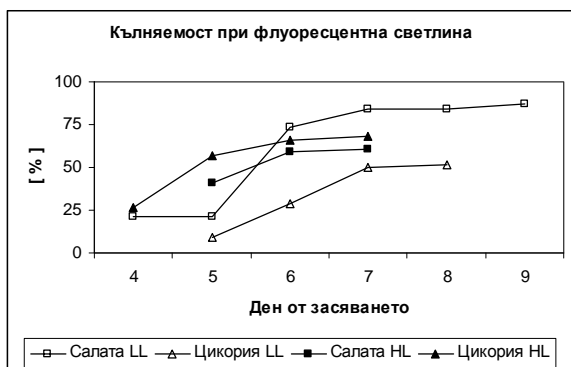
Резултати и дискусия

Резултатите обхващат морфометрични и биохимични анализи, както и анализ на кълняемостта.

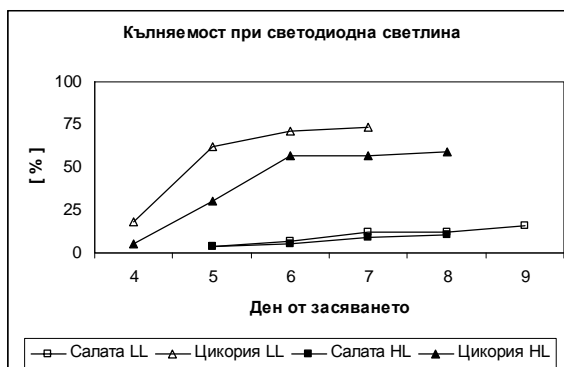
Данните за кълняемостта, определена по броя на поникналите растения (т.е. кълновете, показали се над субстратната повърхност), към общия брой засяти семена (по 56 за двете култури), са показани графично на фигури 1 и 2. Приели сме, поради малката дълбочина на засяване (1 cm), че всяко покълнало семе води до поникване на растение, без да има загинали такива във времето между двете събития.

По отношение на флуоресцентното осветление (експерименти *E5* и *E6*), салатата скъсява наполовина периода си на покълване при повишаване на плътността на фотосинтетичния фотонен поток от 120 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ на 220 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, но кълняемостта ѝ се понижава близо 1.5 пъти. При листната цикория картината е обратна по отношение степента на кълняемост – тя се увеличава 1.3 пъти при по-високите нива на осветеност. Периодът на поникване не се променя по продължителност при двата експеримента, но началото му е отместено с един ден по-рано при *E6*.

¹ Дефинира се като плътност на фотонен поток на фотосинтетично активна радиация. Измерителната единица е $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, като $1 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1} \equiv 6.022 \times 10^{17} \text{ photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.



Фиг. 1. Кълняемост на салата и листна цикория при експерименти *E5* и *E6* с използване на БО на флуоресцентни лампи. Съкращения: LL – Low Light Intensity – $120 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; HL – High Light Intensity – $220 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

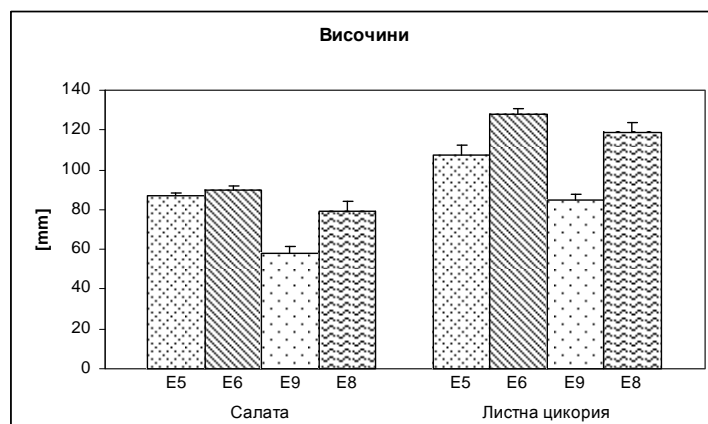


Фиг. 2. Кълняемост на салата и листна цикория при експерименти *E8* и *E9* с използване на БО на светодиоди. Съкращения: LL – Low Light Intensity – $220 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; HL – High Light Intensity – $400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

Избраните нива на фотосинтетично активната радиация (Photosynthetically Active Radiation, PAR²) в експерименти *E8* и *E9* влияят по сходен начин на двете култури: светлината с $400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ PPFD понижава кълняемостта – при листната цикория с 19.5%, а при салатата с 22.3%, докато продължителността на периода на поникване се увеличава при листната цикория и намалява при салатата.

Сравняването на двете нива на осветеност от $220 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ при експерименти *E6* (БО на флуоресцентни лампи) и *E9* (БО на светодиоди) показва, че листната цикория запазва кълняемостта си, продължителността и началото на периода на поникване, докато при салатата се отчита понижаване на кълняемостта с над 73%.

По-значително намаляване на височината на растенията и при двата сорта се наблюдава при светодиодното осветление с PPFD $220 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (*E9*). Намаляване на височината в сравнение с *E6* се установява при *E8*, отново за двете растения (фиг. 3).



Фиг. 3. Височини на салата и листна цикория в края на четирите експеримента.

Свежото тегло при *E6* е два пъти по-високо от това при *E9* и за двата вида растения, но това е за сметка на по-голямото относително водно съдържание в листните тъкани, тъй като абсолютно сухото вещество (АСВ) е по-малко с 33% при салатата и с 18% при листната цикория (табл. 1). Свежите тегла са статистически еднакви при *E5* и *E9* в рамките на двата сорта, но АСВ е повече при *E9* – с 50% при салатата и с 37,5% при листната цикория. Значително повишаване на свежото тегло за двете култури се наблюдава при *E8*, но съдържанието на АСВ е сходно с това при *E6*.

² Радиация с дължина на вълната от 400 до 700 nm.

Табл. 1. Свежо и абсолютно сухо тегло на листа

Растение	Салата				Листна цикория			
	БО-ФЛ		БО-СД		БО-ФЛ		БО-СД	
Блок Осветление	БО-ФЛ		БО-СД		БО-ФЛ		БО-СД	
PPFD, [$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]	120	220	220	400	120	220	220	400
Свежо тегло, [g]	1,726	3,135	1,515	17,099	1,221	2,743	1,378	5,810
	\pm 0,102	\pm 0,272	\pm 0,300	\pm 2,626	\pm 0,165	\pm 0,269	\pm 0,114	\pm 0,721
АСВ, [%]	6	6	9	6.5	8	9	11	9

Извършени са и стандартни биохимични анализи на някои маркерни за стресови въздействия метаболити: малондиалдехид (МДА), водороден пероксид (H_2O_2), пероксидаза (РОХ), пролин и редуциращи захари (табл. 2).

Табл. 2. Данни от биохимични анализи (указана е стандартната грешка на средната стойност)

Растение	Салата				Листна цикория				
	БО-ФЛ		БО-СД		БО-ФЛ		БО-СД		
Блок Осветление	БО-ФЛ		БО-СД		БО-ФЛ		БО-СД		
PPFD, [$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]	120	220	220	400	120	220	220	400	
Анализ	МДА, [$\text{mM}\cdot\text{g}^{-1}$ FW]	0,011(1)	0,015(3)	0,026(1)	0,037(9)	0,017	0,014	0,018(9)	0,037
	H_2O_2 , [$\mu\text{M}\cdot\text{g}^{-1}$ FW]	0,467 \pm 0,008	1,088 \pm 0,038	2,957 \pm 0,081	0,715 \pm 0,070	2,350 \pm 0,092	4,038 \pm 0,071	2,532 \pm 0,694	1,277 \pm 0,105
	РОХ, [$\mu\text{mol}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$]	0,015(3)	0,007(1)	0,007	0,016(2)	0,013(2)	0,005(1)	0,009	0,048(6)
	Пролин, [$\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ FW]	0,133 \pm 0,011	0,212 \pm 0,024	0,689 \pm 0,092	0,466 \pm 0,059	0,090 \pm 0,002	0,144 \pm 0,005	0,496 \pm 0,022	0,587 \pm 0,216
	Ред. захари, [$\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$]	1,35 \pm 0,15	6,85 \pm 2,40	5,08 \pm 0,22	2,25 \pm 0,79	1,23 \pm 0,28	2,58 \pm 1,18	3,62 \pm 0,16	2,59 \pm 0,49

Повишената активност на ензима пероксидаза, установена и за двата сорта растения в експерименти *E5* и *E8*, води до понижаване на концентрацията на водородния пероксид, който е отпаден продукт на метаболизма и силна клетъчна отрова, и като такъв се разгражда от този ензим. Това свидетелства за наличие на по-силен стрес в двата края на ниско и високо нива на осветеност. Нарастването на концентрацията на МДА – отпаден продукт, образуван при окислението на ненаситени мастни киселини, влизащи в състава на клетъчните и вътреклетъчни мембранни системи, – с увеличаване на фотосинтетичния фотонен поток е показател за по-големите фотоувреждания, получавани в клетките и тъканите на листа, при по-високите нива на осветеност. Увеличаването на съдържанието на аминокиселината пролин в двете култури при експериментите на светодиодно осветление (*E8* и *E9*) също индикира по-силен стрес при тези условия на култивиране. Асимилационната способност на растенията може да се оцени по синтезирането и натрупването на първични асимилати – продукти на фотосинтезата (въглехидрати: моно- и полизахариди). Такова натрупване най-силно се наблюдава при *E6* и *E9* за салатата, и при *E9*, *E8* и *E6* за листната цикория, което корелира с изчисленото АСВ (табл. 1).

Изводи

Отчитайки резултатите от направените анализи, могат да се направят следните обобщения:

- 1) подобреният спектър за светодиодното осветление (70% : 20% : 10% RGB) не е оптимален за растежа в началните етапи на развитие на използваните салатни растения (сортове), тъй като при едни и същи нива на PPFD от $220 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (*E6* и *E9*), се получават съществени разлики във физиолого-биохимичните и морфологични показатели на култивираните растения;
- 2) оптималните нива на осветеност при използвания спектрален състав на светодиодното осветление (70% : 20% : 10% RGB) за двата вида салатни растения се намират между $220 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ и $400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ плътност на фотонния поток на фотосинтетично активната радиация;
- 3) високите нива на осветеност ($400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) водят до повишаване на стреса при култивиране на растенията, като по-големите добиви в свежо тегло са с намалена хранителна стойност.

Проведените експерименти дават насоката за бъдещи изследвания по намиране на оптимални светлинни условия от гледна точка на качествен и количествен състав на използваната светлина в началните етапи на растежа и развитието на салатните култури. Тук, още веднъж трябва да се подчертае, че изискванията към тези условия зависят в най-голяма степен от вида на култивираното растение, могат да са различни при различните му сортове и се променят през индивидуалното развитие (онтогенезата) на растителния организъм.

Литература:

1. Ivanova T. N., Yu. A. Bercovich, A. L. Mashinskiy, G. I. Meleshko. The First "Space" Vegetables have been grown in the "SVET" Greenhouse Using Controlled Environmental Conditions. *Acta Astronautica*, Vol. **29**, No. 8, 1993, pp. 639-644.
2. Ivanova T. N., S. M. Sapunova, P. T. Kostov. New Biotechnological Experiment Greenhouse SVET-2 for the MIR-SHUTTLE'95 Mission. *ACTA VET. BRNO*, Vol. **65**, No. 1, 1996, pp. 5-9.
3. Ivanova T. N., P. T. Kostov, S. M. Sapunova, I. W. Dandolo, F. B. Salisbury, G. E. Bingham, V. N. Sychev, M. A. Levinskikh, I. G. Podolski, D. B. Bubenheim, G. Jahns. Six-Month Space Greenhouse Experiments - a Step to Creation of Future Biological Life Support Systems. *Acta Astronautica*, Vol. **42**, Nos. 1-8, 1998, pp. 11-23,
4. Ilieva I., T. Ivanova, Y. Naydenov, I. Dandolo, D. Stefanov. Plant Experiments with Light-emitting Diode Module in SVET Space Greenhouse. *Report on 37th COSPAR Scientific Assembly*, 13-20 July 2008, Montreal, Canada (Adv. Sp. Res. – in print).
5. Naydenov Y., S. Neychev, I. Ilieva. New Plant Shoot Environment Monitoring System for Third Generation SVET Space Greenhouse. *Proceedings of the Third Scientific Conference with International Participation "Space, Ecology, Nanotechnology, Safety" SENS'2007*, 27-29 June 2007, Varna, Bulgaria, pp. 369-373.
6. Gramatcov P., T. Ivanova. SVET-2 Space Greenhouse Light Unit. *Aerospace Research in Bulgaria*, Vol. **16**, 1999, pp. 24-34.
7. Ivanova T., V. Sychev. Project "Greenhouse – Mars" – Plant Growth Study with Different Spectra LEDs Light Units. *Proceedings of the Second Scientific Conference with International Participation "Space, Ecology, Nanotechnology, Safety" SENS'2006*, 14-16 June 2006, Varna, Bulgaria.
8. Найденов Й. Н. Разработка на ситема за мониторинг на средата в Космическа Оранжерия. Изследване на влиянието на параметрите на средата върху физиологичното състояние на растенията. *Дипломна работа за придобиване на образователно-квалификационна степен Магистър*, Биологически Факултет на СУ "Св. Климент Охридски", 2007.
9. Ivanova T. N., I. I. Ilieva, Y. N. Naydenov, V. N. Sychev, M. A. Levinskikh. "Greenhouse-Mars" Project: New light-emitting diode module tests. *Proceedings of the International Conference "Fundamental Space Research"*, 23-28 September 2008, Sunny Beach, Bulgaria, pp. 291-294.