

Научная статья  
УДК 629.788.523.43  
DOI: [10.34759/trd-2022-127-11](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-11)

## **ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЭНЕРГОПИТАНИЯ СЕТИ КЛАСТЕРОВ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ТАНДЕМОМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

**Андрей Олегович Дмитриев**  
АО «НПО Лавочкина»,  
Химки, Московская область, Россия  
[dao@laspase.ru](mailto:dao@laspase.ru)

**Аннотация.** В данной статье предлагается построение тандема космических аппаратов, состоящего из автономного спутника с большой площадью солнечных фотопреобразователей и автономного спутника для передачи полученной энергии на малые космических аппараты с помощью лазерного излучения. Данный тандем связан бесконтактным магнитно-резонансным методом передачи энергии. Таким образом предполагается построение сети автономных космических аппаратов, связанных информационным и энергетическим каналами.

**Ключевые слова:** магнитный резонанс, фотопреобразующие структуры, лазерный канал передачи энергии

*Для цитирования:* Дмитриев А.О. Предложение по обеспечению энергопитания сети кластеров малых космических аппаратов тандемом космических аппаратов // Труды МАИ. 2022. № 127. DOI: [10.34759/trd-2022-127-11](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-11)

Original article

## **PROPOSAL TO PROVIDE POWER SUPPLY TO A NETWORK OF CLUSTERS OF SMALL SPACECRAFT WITH A TANDEM SPACECRAFT**

**Andrey. O. Dmitriev**

Lavochkin Association, Khimki, Moscow region, Russia

[dao@laspaces.ru](mailto:dao@laspaces.ru)

*Abstract.* This article proposes the construction of a tandem of spacecraft consisting of an autonomous satellite with a large area of solar phototransformers and an autonomous satellite for transmitting the received energy to small spacecraft using laser radiation. This tandem is connected by a contactless magnetic resonance method of energy transfer.

To provide the cluster with energy, it is planned to develop a modular, i.e. not mechanically integrated into a single whole, satellite complex – a tandem with a contactless power transmission line. The tandem should consist of spacecraft moving in close orbits interacting with each other via wireless communication and energy transmission lines. The main task of this tandem is to supply energy to a cluster of small spacecraft performing target tasks.

Then conceptually such a complex will have the following structure:

1. A photodetector satellite with a large transformable design of phototransformers deployed in space, including an energy storage system and a magnetoresonance contactless energy transmission system to a satellite emitter.

2. One or more satellite emitters including fiber lasers for transmitting energy to a cluster of small spacecraft in the region of up to 2 microns, as well as several ports of a magnetic resonance energy reception system.

Although at first glance the integral execution of the photodetector-emitter system suggests itself, in practice this is a non-trivial task. Such a large-sized design, which will experience serious temperature changes and at the same time have high requirements for targeting the receivers of the cluster spacecraft, will require a complex stabilization and guidance system. The advantage of fragmentary tandem construction is the absence of such serious requirements and the ability to increase the coverage angle with laser or microwave radiation for cluster satellites. It is also possible to use several satellite emitters for greater coverage of consumers from a cluster of small spacecraft.

**Keywords:** magnetic resonance, phototransforming structures, laser energy transmission channel

**For citation:** Dmitriev A.O. Proposal to provide power supply to a network of clusters of small spacecraft with a tandem spacecraft. *Trudy MAI*, 2022, no. 127. DOI: [10.34759/trd-2022-127-11](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-11)

## Введение

Современная мировая энергетика испытывает ряд проблем: ограниченность полезных ископаемых и экологическое загрязнение от их использования. Эти факторы приводят к увеличению интереса к «зеленой» энергетике, в частности к

солнечной энергии и в том числе к созданию солнечных космических электростанций.

Проект создания солнечной космической электростанции (СКЭС) предполагает размещение космического аппарата с крупными фотобатареями на геостационарной орбите и последующую передачу вырабатываемой энергии (до 10 ГВт) на поверхность Земли с помощью лазерного или СВЧ-излучения. Приемный пункт в таком случае будет представлять из себя большеразмерные ректенны [1].

Основа данной концепции – создание колоссального космического сооружения с габаритами в тысячи метров и массой в сотни тонн, что является нерешаемой задачей в настоящее время. Это послужило отталкивающим фактором для космических агентств и к таким проектам был потерян интерес на идеологическом уровне до конца двадцатого века. Последующие достижения в области создания высокоэффективных солнечных батарей привели к переосмыслению таких проектов хотя бы на уровне демонстрационных космических солнечных электростанций. Хотя массогабаритные параметры таких станций все равно являются главным тормозом для реализации таких проектов в ближайшие годы [1-4]. Если углубиться в это, можно выделить основные технические проблемы, стоящие на пути реализации солнечной космической электростанции:

- первая - это большое количество пусков и создание тяжелых ракет-носителей для вывода на орбиту компонентов электростанции и сборочные операции в космосе;
- вторая – это то, что осуществление передачи энергии с помощью СВЧ-излучения на Землю, потребует создания большеразмерной космической

передающей антенны (с размерами более 1 км при использовании диапазона 2,45 ГГц или 5,8 ГГц с расстоянием 40000 км), которая к тому же потребует высокоточного наведения и создания приемной антенны с диаметром более 15 км [5]. На данный момент невозможно обеспечить изготовление и функционирование со стабильными параметрами такого приемно-передающего комплекса.

Свежие достижения в области электроники СВЧ и лазерных излучателей, новых композитных материалов для фотопреобразователей, а также тенденции в развитии систем управления космических систем позволяют по-новому взглянуть на применение схем и систем космической электростанции для реализации новых информационных космических систем.

Одним из таких направлений являются кластерные космические системы типа Iridium и Starlink [6-7]. Данные системы представляют собой кластеры (до 1000 аппаратов) связанных между собой межспутниковой связью, что обеспечивает всемирное информационное покрытие [8].

В дальнейшем рассматривается развитие технологии связанных между собой спутниковых группировок. В NASA-DARPA такой проект получил название «F6» [9].

### **Предложение по проекту тандема КА**

В данной работе предлагается использовать принципы бесконтактной передачи не только для информационных связей, но и для энергетических потоков, чтобы сделать кластеры из космических аппаратов, связанные информационно-энергетическими потоками (радиосвязью и межспутниковой лазерной

навигационно-связной системой) для увеличения эффективности выполнения целевых задач [10-12].

Для обеспечения кластера энергией предполагается разработка модульного, т.е. не объединенного механически в единое целое, спутникового комплекса – тандема с бесконтактной линией энергопередачи. Тандем должен состоять из движущихся по близким орбитам космических аппаратов, взаимодействующих друг с другом по беспроводным линиям связи и передачи энергии. Основная задача данного тандема – снабжение энергией кластера малых КА, выполняющих целевые задачи.

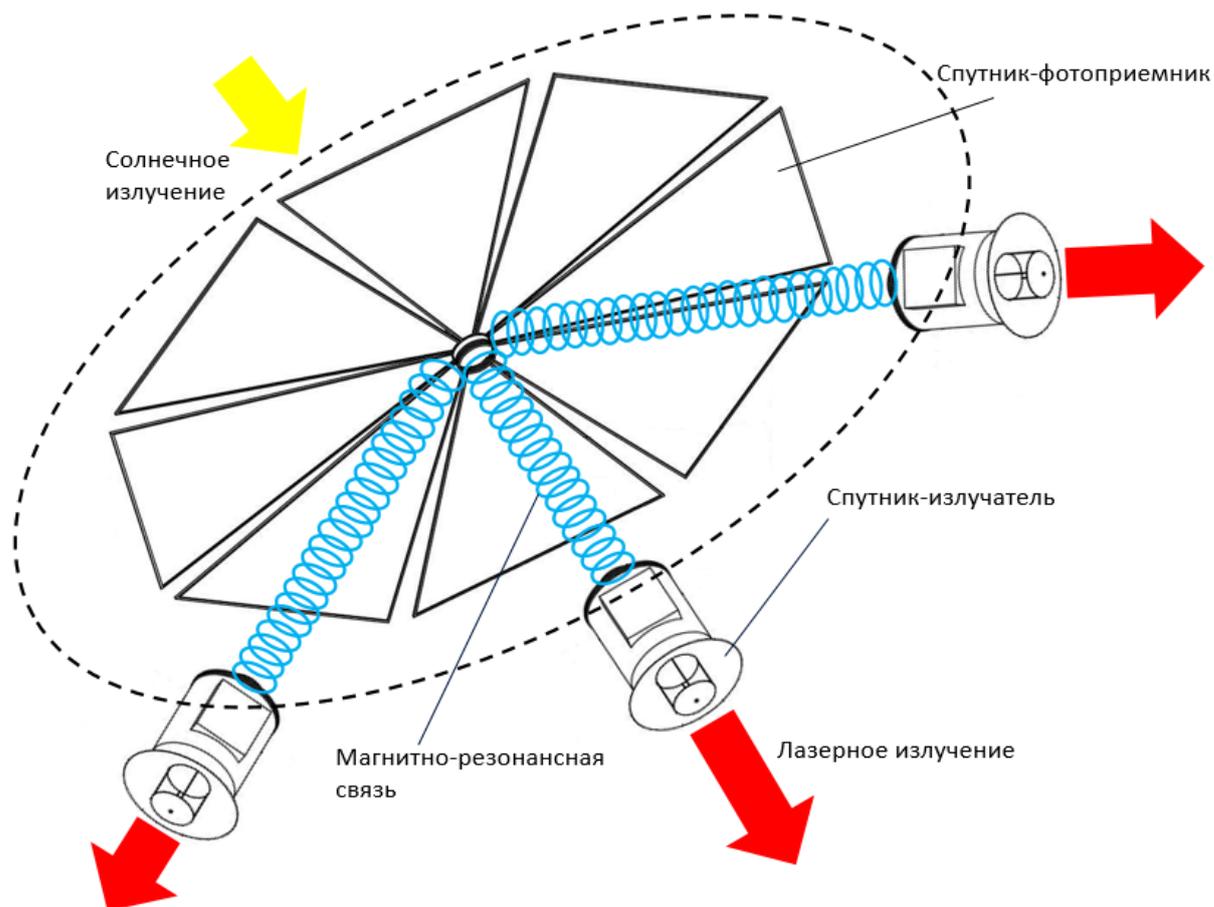


Рис. 1. Структура тандема КА для осуществления бесконтактного информационно-энергетического снабжения кластера малых КА

Тогда концептуально такой комплекс будет иметь следующую структуру (рисунок 1):

1. Спутник-фотоприемник с разворачиваемой в космосе большой трансформируемой конструкцией фотопреобразователей, включающий в себя систему накопления энергии и магниторезонансную бесконтактную систему передачи энергии на спутник-излучатель.

2. Один или несколько спутников-излучателей включающих в себя волоконные лазеры для передачи энергии кластеру малых КА в области до 2 мкм, а также несколько портов магниторезонансной системы приема энергии.

Хотя на первый взгляд напрашивается цельное исполнение системы фотоприемник-излучатель, на практике это является нетривиальной задачей. Настолько крупногабаритная конструкция, которая будет испытывать серьезные перепады температур и при этом иметь высокие требования к наведению на приемники КА кластера, потребует сложной системы стабилизации и наведения. Преимуществом фрагментарного построения тандема является отсутствие таких серьезных требований и возможность увеличить угол покрытия лазерным или СВЧ-излучением для спутников кластера. Также появляется возможность использования нескольких спутников-излучателей, для большего охвата потребителей из кластера малых КА (рисунок 2).

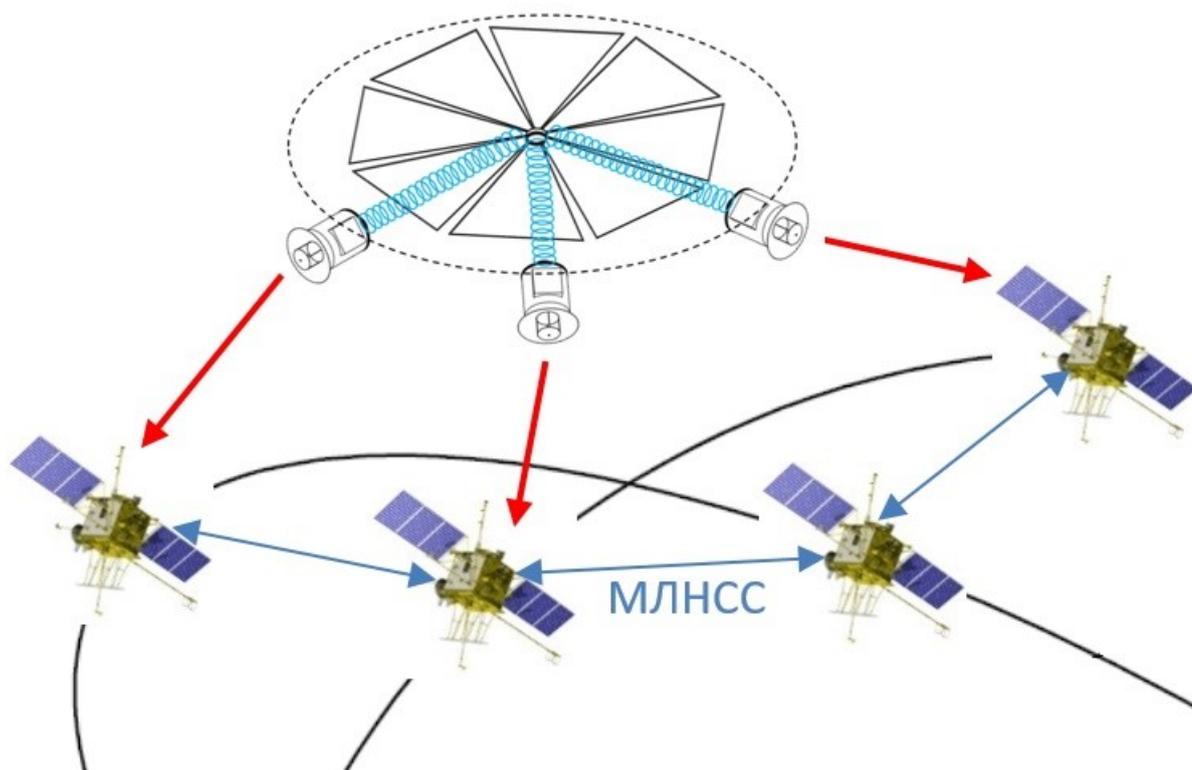


Рис.2. Взаимодействие кластер малых КА и тандема информационно-энергетического снабжения

Краеугольным элементом данного комплекса является создание трансформируемой конструкции большеразмерной фотопреобразующей панели для накопления и преобразования солнечного излучения в электрическую энергию с ее последующей передачей бесконтактной магниторезонансной системой на спутник-излучатель.

Такую большеразмерную фотопреобразующую панель предлагается создать на основе различных схем разворачивания центробежным механизмом, используемых, например, в проектах солнечного паруса [13], или с использованием отверждаемых композитных материалов [14-15].

Фотопреобразующие конструкции из тонкоплёночных материалов успешно применены в японском проекте Icaros. Фотопанели высокоэффективных

поликристаллических солнечных элементов на основе тонких пленок ZnO/CdS/CuInGaSe<sub>2</sub> позволяют получить до 250 Вт/м<sup>2</sup> при толщине этих преобразователей менее 40 мкм [16]. Это позволит обеспечить до 1 МВт электрической мощности при развертке фотопреобразующих панелей с пленочным покрытием площадью 100 м<sup>2</sup>.

Для передачи энергии со спутника-излучателя потребителям из кластера целесообразно использовать лазерное излучение. Задача формирования узких пучков при сохранении адекватного размера генераторов излучения гораздо проще решается применением лазерного диапазона, чем СВЧ-излучения. Это в свою очередь позволит уменьшить габариты фотоприемного модуля на аппаратах-потребителях из кластера, что критически важно для группировки малых КА. Этому также способствует прогресс в области развития волоконных лазеров, которые могут похвастаться мощностью более 100 кВт [17] и эффективностью порядка 80% [18] при компактном модуле генерации.

Процесс бесконтактной магнитно-резонансной связи может использоваться для энергетического тандема КА, а достижения в области индукционной бесконтактной передачи энергии [19-20] позволяют рассчитывать на КПД до 90%, мощность передачи несколько киловатт и расстояние передачи порядка нескольких метров (в перспективе больше 10 метров). Преобразователи в высокочастотное излучение (1÷10 МГц) будут представлять из себя небольшие катушки-резонаторы (диаметром до 1 м).

## Заключение

Текущий темп развития систем бесконтактной магнитно-резонансной передачи энергии позволит к началу создания космических кластерных систем передавать более 100 кВт мощности на расстояния свыше десяти метров, что позволит создать проект энергетического тандема из двух КА. А в будущем и повысить количество спутников-излучателей для увеличения эффективности и энергетики системы и увеличения количества потребителей в кластере.

### Список источников

1. Glaser P.E. Power from the Sun: its Future // Science, 1968, vol. 162, pp.856-861.  
DOI: [10.1126/science.162.3856.857](https://doi.org/10.1126/science.162.3856.857)
2. Вятлев П.А., Дмитриев А.О., Карчаев Х.Ж., Сысоев В.К. Оценка эффективности космической солнечной электростанции на основе лазерного канала передачи энергии // Труды МАИ. 2016. № 87. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=69658>
3. Сысоев В.К., Барабанов А.А., Дмитриев А.О., Нестерин И.М., Пичхадзе К.М., Суйменбаев Б.Т. Анализ компоновочных схем демонстрационной солнечной космической электростанции // Труды МАИ. 2014. № 77. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=52959>
4. Сысоев В.К., Понамаренко А.Д., Верлан А.А. Мировые тенденции развития космических электростанций // Альтернативный киловатт. 2011. № 5 (11). С. 14-18.

5. Баркова М.Е. Определение координат ректенн с использованием методов космической геодезии // Геология, география и глобальная энергия. 2016. № 4 (63). С. 36–43.
6. Jaejoo Lim, Richard Klein, Jason Thatcher. Good technology, bad management: A case study of the satellite phone industry // Journal of Information Technology Management. Association of Management, 2005, 16 (2), pp. 48–55.
7. SpaceX non-geostationary satellite system. Attachment a technical information to supplement schedule. URL: <https://fcc.report/IBFS/SAT-LOA-20161115-00118/1158350.pdf>
8. Jiang J., Chen Q., Yao B., Guo J. Desired Compensation Adaptive Robust Control of Mobile Satellite Communication System with Disturbance and Model Uncertainties // International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 2013, vol. 9, no. 1, pp. 153 – 164.
9. Shah N., Brown O.C. Fractionated Satellites: Changing the Future of Risk and Opportunity for Space Systems // High Frontier, 2008, vol. 5, no. 1, pp. 29-36.
10. Сысоев В.К., Пичхадзе К.М., Верлан А.А., Папченко Б.П. Концепция модульной космической электростанции с лазерным каналом передачи энергии // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 8. С. 116-119.
11. Баркова М.Е. Радионавигационное обеспечение солнечной космической электростанции // Труды МАИ. 2021. № 116. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=121078>. DOI: [10.34759/trd-2021-116-09](https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-09)

12. Баркова М.Е. О выборе параметров орбиты космического сегмента солнечной космической электростанции // Труды МАИ. 2016. № 89. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=72899>
13. Комков В.А., Мельников В.М., Харлов Б.Н. Формируемые центробежными силами космические солнечные батареи. - М.: Черос, 2007. - 188 с.
14. Дюков В.А. Оптимизация технологического процесса автоклавного формования композитных авиационных конструкций сложной формы с предварительным исправлением их геометрии // Труды МАИ. 2021. № 116. URL:<http://trudymai.ru/published.php?ID=121089>. DOI: [10.34759/trd-2021-116-12](https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-12)
15. Финченко В.С., Пичхадзе К.М., Ефанов В.В. Надувные элементы в конструкциях космических аппаратов — прорывная технология в ракетно-космической технике: монография. - Химки: НПО Лавочкина, 2019. С. 416-450.
16. Ramanathan K., Contreras M.A., Perkins C.L., Asher S. et al. Properties of 19.2% efficiency ZnO/CdS/CuInGaSe<sub>2</sub> thin-film solar cells // Progress in Photovoltaics Research and Applications, 2003, no. 11 (4), pp. 225-230. DOI:[10.1002/pip.494](https://doi.org/10.1002/pip.494)
17. IPG Photonics Corporation. The Fiber Laser Company™. Needham's 14<sup>th</sup> Annual Growth Conference. January 2012. URL: <https://seekingalpha.com/article/318740-ipg-photonics-cfo-presents-at-14th-annual-needham-growth-conference-transcript>
18. Курков А.С., Шолохов Е.М., Цветков В.Б. и др. Гольмиевый волоконный лазер с рекордной квантовой эффективностью // Квант. Электроника. 2001. № 41 (6). С. 492-494.

19. Barker D., Summerer L. Assessment of field wireless power transmission for fractionated spacecraft applications // 62 International Astronautical Congress 2011, Cape Town, South Africa.

20. Kurs A., Mofatt R., Soljacic M. Simultaneous mid-range power transfer to multiple devices // Applied Physics Letters, 2010, vol. 96, no. 4, pp. 44-109.

DOI:[10.1063/1.3284651](https://doi.org/10.1063/1.3284651)

## References

1. Glaser P.E. Power from the Sun: its Future, *Science*, 1968, vol. 162, pp.856-861. DOI: [10.1126/science.162.3856.857](https://doi.org/10.1126/science.162.3856.857)

2. Vyatlev P.A., Dmitriev A.O., Karchaev Kh.Zh., Sysoev V.K. *Trudy MAI*, 2016, no. 87  
URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=69658>

3. Sysoev V.K., Barabanov A.A., Dmitriev A.O., Nesterin I.M., Pichkhadze K.M., Suimenbaev B.T. *Trudy MAI*, 2014, no. 77. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=52959>

4. Sysoev V.K., Ponamarenko A.D., Verlan A.A. *Al'ternativnyi kilovatt*, 2011, no. 5 (11), pp. 14-18.

5. Barkova M.E. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya*, 2016, no 4 (63), pp. 36–43.

6. Jaejoo Lim, Richard Klein, Jason Thatcher. Good technology, bad management: A case study of the satellite phone industry, *Journal of Information Technology Management Association of Management*, 2005, 16 (2), pp. 48–55.

7. *SpaceX non-geostationary satellite system. Attachment a technical information to supplement schedule.* URL: <https://fcc.report/IBFS/SAT-LOA-20161115-00118/1158350.pdf>
8. Jiang J., Chen Q., Yao B., Guo J. Desired Compensation Adaptive Robust Control of Mobile Satellite Communication System with Disturbance and Model Uncertainties, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 2013, vol. 9, no. 1, pp. 153 – 164.
9. Shah N., Brown O.C. Fractionated Satellites: Changing the Future of Risk and Opportunity for Space Systems, *High Frontier*, 2008, vol. 5, no. 1, pp. 29-36.
10. Sysoev V.K., Pichkhadze K.M., Verlan A.A., Papchenko B.P. *Opticheskii zhurnal*, 2012, vol. 79, no. 8, pp. 116-119.
11. Barkova M.E. *Trudy MAI*, 2021, no. 116. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=121078>. DOI: [10.34759/trd-2021-116-09](https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-09)
12. Barkova M.E. *Trudy MAI*, 2016, no. 89. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=72899>
13. Komkov V.A., Mel'nikov V.M., Kharlov B.N. *Formiruemye tsentrobezhnymi silami kosmicheskie solnechnye batarei* (Space solar panels formed by centrifugal forces), Moscow, Cheros, 2007, 188 p.
14. Dyukov V.A. *Trudy MAI*, 2021, no. 116. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=121089>. DOI: [10.34759/trd-2021-116-12](https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-12)
15. Finchenko V.S., Pichkhadze K.M., Efanov V.V. *Naduvnye elementy v konstruktsiyakh kosmicheskikh apparatov — proryvnaya tekhnologiya v raketno-kosmicheskoi tekhnike*

(Inflatable elements in spacecraft structures - breakthrough technology in rocket and space technology), Khimki, NPO Lavochkina, 2019, pp. 416-450.

16. Ramanathan K., Contreras M.A., Perkins C.L., Asher S. et al. Properties of 19.2% efficiency ZnO/CdS/CuInGaSe<sub>2</sub> thin-film solar cells, *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, 2003, no. 11 (4), pp. 225-230. DOI:[10.1002/pip.494](https://doi.org/10.1002/pip.494)

17. IPG Photonics Corporation. *The Fiber Laser Company*<sup>TM</sup>. Needham's 14th Annual Growth Conference, January 2012. URL: <https://seekingalpha.com/article/318740-ipg-photonics-cfo-presents-at-14th-annual-needham-growth-conference-transcript>

18. Kurkov A.S., Sholokhov E.M., Tsvetkov V.B. et al. *Kvant. Elektronika*, 2001, no. 41 (6), pp. 492-494.

19. Barker D., Summerer L. Assessment of field wireless power transmission for fractionated spacecraft applications, *62 International Astronautical Congress*, 2011, Cape Town, South Africa.

20. Kurs A., Moftatt R., Soljagic M. Simultance mid-range power transfer to multiple devices, *Applied Physics Letters*, 2010, vol. 96, no. 4, pp. 44-109. DOI:[10.1063/1.3284651](https://doi.org/10.1063/1.3284651)

Статья поступила в редакцию 01.11.2022

Статья после доработки 12.11.2022

Одобрена после рецензирования 15.11.2022

Принята к публикации 26.12.022

The article was submitted on 01.11.2022; approved after reviewing on 15.11.2022; accepted for publication on 26.12.2022