

*А.А. КОНОВАЛЬЦЕВ, канд. техн. наук, Ю.А. ЛУЧАНИНОВ, М.А. ОМАРОВ, канд. техн. наук,
В.М. ШОКАЛО, д-р. техн. наук,*

ПРИМЕНЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ БЕСПРОВОДНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ СВЧ-ЛУЧОМ

Практическое воплощение идеи беспроводной передачи энергии СВЧ-лучом стало возможным в 60-е годы в связи с развитием мощных источников генерирования СВЧ-энергии, появлением основополагающих работ Грубо по максимизации КПД передачи между двумя апертурами [1] и в связи с изобретением Брауном ректенны [2], преобразующей энергию электромагнитных волн в энергию постоянного тока. Результатом этих работ явилось создание нового типа энергетических систем - систем передачи энергии с помощью СВЧ-луча (СПЭСЛ).

Возможность создания эффективных СПЭСЛ и целесообразность их практического использования подтверждена в настоящее время результатами проведения целого ряда демонстрационных экспериментов. Четыре из них отмечены в работе [3] как важнейшие достижения в области беспроводной передачи энергии.

Прежде всего - это первая демонстрация полета летательного аппарата, запитываемого СВЧ-лучом [2]. В этом опыте, который был выполнен под руководством Брауна, использовалась ректенна с кремниевыми выпрямительными диодами, имевшими низкий КПД. Этому недостатка удалось избежать при второй демонстрации полета вертолета, на котором была установлена ректенна с диодами Шоттки [4]. В этом эксперименте впервые использовались электронные системы наведения СВЧ-луча на апертуру ректенны, которые должны быть неотъемлемой частью СПЭСЛ.

Третья важная демонстрация - это лабораторный опыт по беспроводной передаче энергии, в результате которого была доказана возможность достижения КПД СПЭСЛ 54% с учетом КПД преобразования энергии первичного источника постоянного тока в энергию СВЧ [4]. Достигнутый результат является пока наилучшим среди известных экспериментальных данных.

Наиболее крупномасштабный полигонный эксперимент по передаче 30 кВт СВЧ-мощности на расстояние в одну морскую милю (1,6 км) был проведен в 1975 г. [4]. Ректенна содержала примерно 5 тысяч приемно-выпрямительных элементов, каждый из которых преобразовывал 6Вт СВЧ мощности. Измеренный КПД ректенны равнялся 82% на частоте 2388 МГц.

Проведенные демонстрационные эксперименты позволили осознать реальность осуществления беспроводной передачи энергии с помощью СВЧ-луча и приступить к разработке большого числа различных проектов СПЭСЛ, в том числе используемых для подпитки высотных платформ [4-7], космических аппаратов [8-12], реактивных двигательных установок межорбитальных буксиров [13-15] с поверхности Земли, с низкой или геостационарной орбиты. Обсуждалась также возможность энергоснабжения наземных потребителей от солнечных космических электростанций (СКЭС) [16-19], от удаленных наземных источников [20,21] и др.

Особое место среди перечисленных проектов занимают работы по специальной научно-исследовательской программе Министерства энергетики США (ДОЕ) и НАСА в 1977-1980 гг. [18]. Результаты этих работ позволили сформировать основные представления о физических и технических особенностях солнечных космических электростанций. Краткие сведения о результатах работ по программе ДОЕ/НАСА и характеристики базового варианта СКЭС приведены в табл. 1 и на рис. 1.

В программе ДОЕ/НАСА рассматривалась возможность создания в начале XXI века системы из 60 энергоспутников: по две СКЭС в год с единичной мощностью 5 ГВт каждая. Считалось, что СКЭС может стать одним из крупномасштабных источников энергии в XXI веке. Однако, так как строительство их требует существенных затрат, то правительством США было решено не форсировать практическую реализацию СКЭС, а продолжить исследование в областях, наиболее существенных для СПЭСЛ.

Дальнейшее развитие СПЭСЛ (80-90-е гг.) шло в двух направлениях. Первое направление - это создание СПЭСЛ небольшой мощности, применяемых в системах идентификации транспорта, грузов и товаров в складских помещениях, а также используемых в качестве дистанционно управляемых источников энергоснабжения аппаратуры конфиденциальной связи [22].

Второе направление - разработка крупномасштабных СПЭСЛ. Характерной особенностью последних работ в этом направлении является переход от исследований в дециметровом диапазоне

волн к исследованиям в сантиметровом и миллиметровом диапазонах [3]. Повышение рабочей частоты приводит к существенному сокращению габаритов СПЭСЛ. Например [23], при проектировании системы энергоснабжения высотной платформы (высота 20,0 км) с диаметром ректенны 11,5 м передающая антенна при рабочей частоте СПЭСЛ 2,45 ГГц должна иметь диаметр 193м, а на частоте 35 ГГц эффективная передача энергии СВЧ обеспечивается при диаметрах апертур передающей антенны и ректенны всего 13,5 м.

Таблица 1

| Параметр | Численное значение |
|--|--|
| Общее число СКЭС | 60 |
| Выходная мощность единичной СКЭС | 5 ГВт |
| Площадь панелей солнечных батарей | 5 × 10 км ² |
| Масса энергоспутника (включая 25%-ную надбавку на возможные ошибки): | |
| СКЭС с Si –фотобатареями | 50 000 тонн |
| СКЭС с GaAs –фотобатареями | 34 000 тонн |
| Диаметр передающей антенны | 1 км |
| Размеры приемной антенны на широте 350 | 10 × 13 км |
| Рабочая длина волны | 12,245 см |
| Максимальная плотность мощности на приемной антенне | 0,23 кВт/м ² |
| Максимальная плотность мощности на передающей антенне | 23 кВт/м ² |
| Форма распределения поля на передающей антенне: | |
| фазовое распределение | квадратичное, с фокусировкой на центр приемной антенны |
| амплитудное распределение | гауссовское, со спадением к краям апертуры на 10 дБ |
| Поляризация поля | линейная |
| КПД передачи энергии | 95% |
| Общий КПД тракта передачи энергии | 63% |
| Общая сумма капитальных затрат на 20-летний период, включая запуск первой СКЭС | 102,4 млрд. \$ ¹⁾ |
| Стоимость создания каждой следующей СКЭС | 11,3 млрд. \$ |
| Ресурс работы СКЭС | 30 лет |
| Время полной окупаемости СКЭС | 1 – 6 лет |

¹⁾ или 25 млрд. \$ без стоимости разработки транспортных средств

Определенным итогом исследований по СПЭСЛ в последнее десятилетие являются работы [3,24], в которых определены пути применения и стратегия развития СПЭСЛ. По современным воззрениям крупные СПЭСЛ - это системы, с помощью которых может быть осуществлен переход от двумерных энергетических сетей на Земле к трехмерным энергетическим комплексам будущего [3]. Один из возможных вариантов трехмерного энергетического комплекса показан на рис 2. Он состоит из солнечных космических электростанций на геостационарной (1) и низкой (5) орбитах, транспортирующих энергию на космические (2,3,4) и наземные (9) потребители, и наземной СПЭСЛ (8), служащей для энергоснабжения с Земли космических кораблей с электрореактивными двигателями (ЭРД) и беспилотных летательных аппаратов (БЛА) (6,7).

Основные этапы развития СПЭСЛ, обсуждаемые в [24], приведены в таблице 2. Предполагается, что наиболее быстро будут завершены разработки БЛА (высотных стационарных платформ, самолетов, дирижаблей и др.). Спектр применений БЛА очень широкий. Разведка, экологические наблюдения, ретрансляция информации и т.д. По данным специалистов, система связи на основе БЛА будет в 2-3 раза дешевле спутниковой. Исследование БЛА охватывает широкий круг вопросов, связанных с формированием облика этих аппаратов и определением рациональных областей их применения. Часть этих исследований уже проведена в России [25]. В результате выяснено, что наиболее целесообразным типом БЛА для передачи энергии на борт СВЧ-лучом является самолет с большим удлинением крыла или дирижабль.

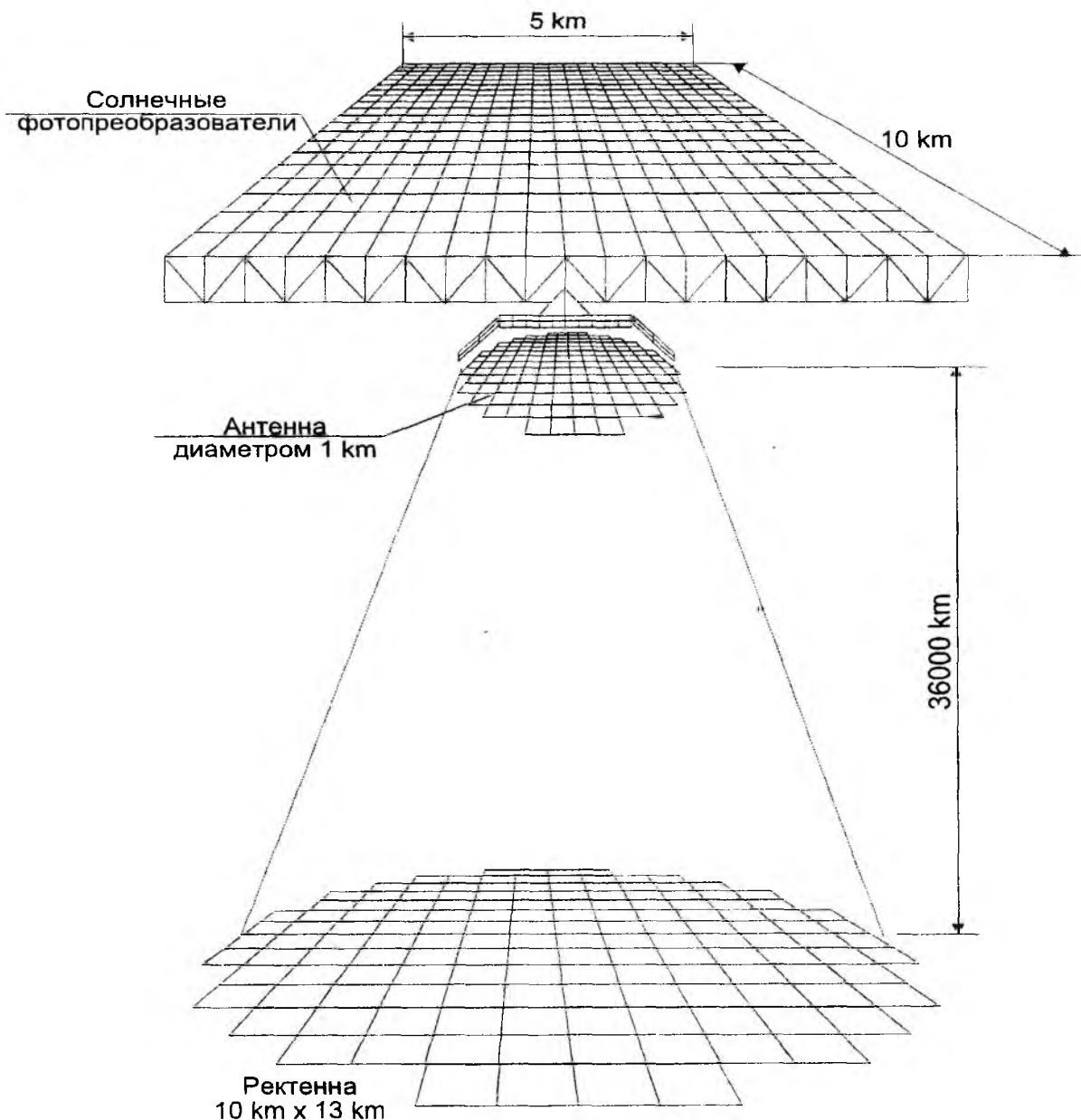


Рис. 1

Над созданием БЛА (программа SHARP) успешно работают канадские специалисты. Предполагаемые характеристики создаваемой ими системы следующие [5]. БЛА должен летать по замкнутой траектории на высоте около 20 км и снабжаться энергией с Земли СВЧ-пучком на частоте 2,45 ГГц. В качестве передающей антенны решетки будут использоваться 260 параболоидов с комбинированным управлением лучом, диаметр передающей решетки - 70 м, излучаемая мощность - 500кВт. Диаметр пучка на высоте 20 км составит 30 м, т.е. примерно будет равен размеру самолета. Величина плотности мощности на приемной антенне - 500 Вт/м, на ее выходе предполагается снимать около 300 кВт мощности постоянного тока, необходимых для питания электромотора.

Возможность практической реализации проекта SHARP подтверждена запуском масштабной модели БЛА [26,27] (рис. 3). БЛА запитывался волнами СВЧ круговой поляризации, поэтому ректенна состояла из двух ортогональных решеток (рис. 4), функционирующих самостоятельно при облучении линейно поляризованным полем.

В последнее время широкие исследования по созданию БЛА типа высотных платформ проводятся в Японии [28]. Вариант японской многофункциональной высотной платформы изображен на рис. 5.

Таблица 2

| | ГСО/НО (низкая орбита) | Луна и околорунное пространство | Планеты | Земля | Солнечные системы |
|--|---|--|---|---|---|
| С поверхности Земли | Энергия для космических шаттлов | Снабжение энергией космических транспортных систем и лунных баз | Снабжение энергией транспортных систем и баз на: - Фобосе; - Деймосе; - Марсе; - астероидах | Передача энергии с ГСО для использования на Земле | Использование внеземной энергии и материалов для пользы человечества |
| Демонстрация передачи энергии СВЧ лучом | Снабжение космических станций и одноорбитных платформ | Снабжение энергией ретрансляцион- ных спутников на геостационар- ной орбите (ГСО) | | Использование лунных материалов | Передача энергии с Луны |
| Самолет с подпиткой СВЧ-энергией | Снабжение космических транспортов на НО | | | | |
| Другие | | | | | |
| 995 | 2000 | 2005 | 2010 | 2015 | 2030 |
| | | | | | Годы |

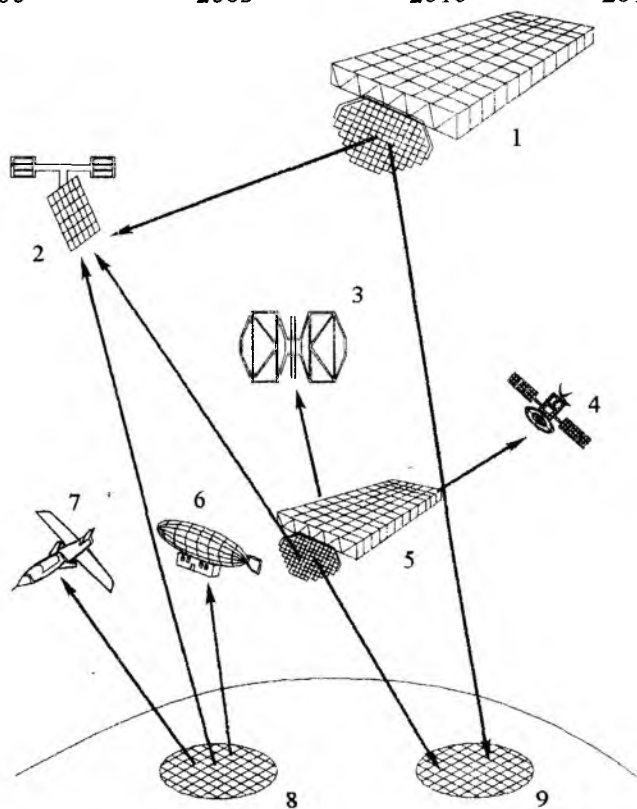


Рис. 2

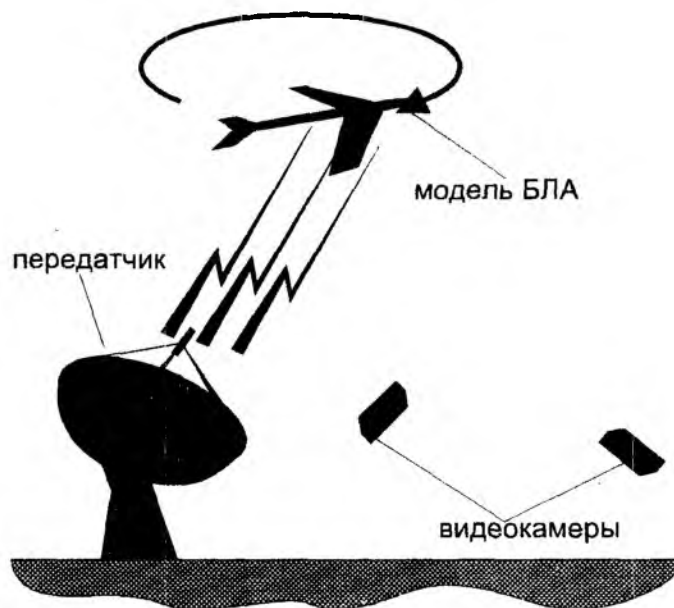
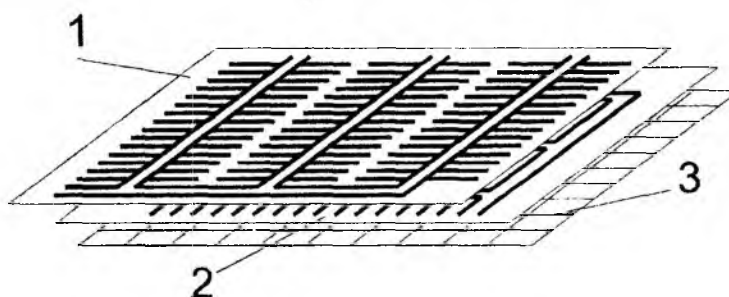


Рис. 3



1, 2 – платы ортогональных решеток ПВЭ, 3 – экран

Рис. 4

К числу ближайших задач развития СПЭСЛ относится также и передача энергии на Земле из богатых энергией районов в труднодоступную местность (например, поселения на Аляске [24]), или передача энергии от возобновляемых источников (солнечных, ветровых, станций прилива) к наземным потребителям.

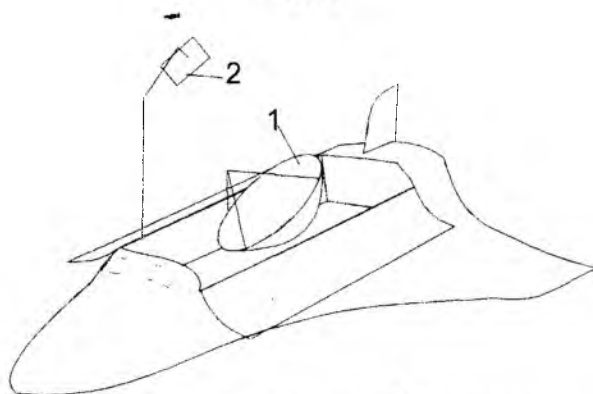
Более дальняя перспектива передачи энергии СВЧ-лучом - это создание космической энергетики для обеспечения жизнедеятельности человека в космосе и осуществления электродвижения космических аппаратов. В силу ряда уникальных свойств, СПЭСЛ являются наиболее приспособленными для космоса энергетическими системами. Среди них возможность быстро изменять направление передачи и отсутствие потерь энергии при ее передаче через вакуум космоса [4].

Перечисленные свойства позволяют рассмотреть проекты снабжения энергией ряда космических объектов с одной орбитальной станции и поставить вопрос о создании сверхдальних СПЭСЛ с рабочей частотой 100 ГГц или 300 ГГц, функционирующих на трассе Луна - Космос [23]. Развитие космических СПЭСЛ требует проведения целого ряда дорогостоящих экспериментов в космосе. Первый планируемый из них - это демонстрация в ближайшем будущем передачи энергии с помощью СПЭСЛ, установленной в грузовом отсеке транспортного корабля (рис. 6) [29]. Расстояние передачи 10-20 м на частоте 2,45 ГГц при мощности передатчика 250 Вт и КПД всей системы 60%.

Браун считает [3], что передача энергии СВЧ-лучом - технологический прорыв в организации электродвижения космических аппаратов. Прежде всего, это обусловлено параметрами ректенн, которые как источник мощности постоянного тока имеют весьма низкое отношение выходной мощности к массе - 1 кВт/кг. По оценкам специалистов, применение СПЭСЛ для питания ЭРД позволит создать транспортную систему, которая будет иметь на порядок меньше отношение массы корабля к массе полезного груза, чем космический аппарат с химическим двигателем.



Рис. 5



1 – передающая антенна; 2 – ректенна

Рис. 6

Применение крупномасштабных СПЭСЛ сопряжено с необходимостью решения целого ряда экономических, экологических, социальных проблем и проблем электромагнитной совместимости. Наиболее детально эти проблемы рассмотрены применительно к СКЭС в работе [30], как части программы CDEP Департамента энергетики США и NASA. СКЭС сравнивались с альтернативными энергетическими системами, включая угольные, ядерные и наземные фотоэлектрические, по показателям цены единицы вырабатываемой энергии, влияния на здоровье и безопасность людей, окружающую среду и электромагнитные системы. Оценки показали следующее:

- стоимость энергии, вырабатываемой СКЭС, лежит в пределах колебаний цен на энергию альтернативных энергетических технологий;
- все рассматриваемые технологии имеют заметное, хотя и разное, негативное влияние на здоровье людей и состояние окружающей среды;
- суммарное количество земли, требуемое для полного сырьевого цикла, приблизительно одинаково для всех энергетических технологий, однако для размещения ректенн СКЭС и наземных фотоэлектрических систем может понадобиться большая площадь; выходом из этого положения является сооружение ректенн на прибрежных плавучих структурах.

За последние 3-4 года исследования по проблеме беспроводной передачи энергии существенно расширились. Результаты их рассмотрены на Второй международной конференции по беспроводной передаче энергии, состоявшейся в 1995 г. в г.Кобе. Здесь был доложен ряд концептуальных докладов, в

которых рассматривались сценарии построения энергетических станций в Космосе и на Луне. Некоторые проекты уже разработаны в деталях. Следует отметить, что в Японии начаты работы по созданию солнечного энергетического спутника SPS-2000 [31], который предназначен для энергоснабжения некоторых районов Танзании и Папуа Новой Гвинеи. Расчетный КПД проектируемой СКЭС равен 0,5 % и вычислялся он как отношение мощности, дошедшей до наземного потребителя, к мощности солнечной энергии, поглощаемой космическими фотобатареями с КПД преобразования 10%. В 10% оценен собственно КПД СПЭСЛ (потери перехвата энергии СВЧ-луча, потери в СВЧ-генераторе и в ректенне). При расчетах также предполагалось, что доставка энергии по проводам от ректенны до реальных потребителей будет осуществляться с КПД 50%.

Приведенный краткий обзор состояния разработок и перспектив создания СПЭСЛ указывает на актуальность рассматриваемой проблемы и ее все усиливающееся влияние на процесс развития мировой энергетики.

Список литературы: 1. *Goubau G., Schwering F.* On the guided propagation of electromagnetic wave beams // IRE Trans. Antennas Propagation. 1961. v. AP-9. p.248-256. 2. *Brown W.C.* Experimental involving a microwave beam to power and position a helicopter // IEEE Trans., v. AES-5, 1969, No.9, p.692. 3. *Brown W.C., Eves E.E.* Microwave power transmission and its application to space // IEEE Trans. 1992. v. MTT-40. No.8. p. 1239-1250. 4. *Brown W.C.* The history of power transmission by radio waves // IEEE Trans. 1984. v. MTT-32. No.9. p. 1230-1242. 5. *Fisher A.* Secret of perpetual flight? Beam-power plane // Popular Science. 1988. v.232. No.1. p. 62-65. 6. *Morris C.E.* Microwave powered, unmanned, high-altitude airplanes // Journal of aircraft. 1984. v.21. No.12. p.966-970. 7. *Brown W.C.* Microwave powered, long duration, high-altitude platform // Internal. microwave symp. N.Y.: IEEE. 1986. p.507-510. 8. *Glaser P.E.* Microwave power transmission for use in space // Microwave Journal. 1986. No.12. p.44-58. 9. *Arndt G.D., Kerwin E.M.* Application of earth-orbit power transmission // Space power. 1986. No.12. p.44-58. 10. *Landis G.A.* A new space station power system // Acta astronautica. 1988. v.17. No.9. p.975-977. 11. *Chang K., McCleary J.C., Pollock M.A.* Feasibility study of 35 GHz microwave transmission in space // Solar power. 1989. v.8. No.3. p. 365-370. 12. *Hoffert M.I., Miller G., Kadiramangalam M., Ziegler W.* Earth-to-satellite microwave power transmission // Journal of propulsion and power. 1989. v.5. No.6. p.750-758. 13. *Minovith M.A.* Solar powered, self-refueling, microwave propelled interorbital transportation system // AIAA Paper. 1983. No.1446. 14. *Brown W.C.* Earth to space DC power transmission system utilizing a microwave beam as a source of energy for electric propelled interorbital vehicles // AIAA Paper. 1985. No.2045. 15. *Brown W.C.* All electronic propulsion - key to future spaceship design // AIAA Paper. 1988. No. 3170. 16. *Glaser P.E.* Power from the Sun: its future // Science. 1968. v.162. P.857-861. 17. *Ванке В.А., Лопухин В.М., Саввин В.Л.* Проблемы солнечных космических электростанций // Успехи физических наук. 1977. Т.123. Вып.4. С.633-656. 18. *Satellite power system concept development and evaluation program* // Reference system report. Wash.: DOE/ER. 1978. (DOE/ER - 0023). 19. *Книжник Р.С., Кочубей А.Н.* Передача энергии пучком СВЧ радиоволн и солнечные космические электростанции // Зарубежная радиоэлектроника. 1983. № 7. С.75-84. 20. *Rogers T.F.* Reflector satellites for solar power // IEEE Spectrum. 1981. V.18. No.7. p.38-43. 21. *Angelini A.M.* On the possibility of intercontinental power transmission via satellite // Space power. 1988. V.7. No.2. P.175-186. 22. *Пат.3745569 США, МКИ G01s 9/56*, Remotely powered transponder // Works G.A., Murray J.C., Ostroff E.D., Freedman N. (USA), July 10, 1973. 23. *Koert P., Cha J.T.* Millimeter wave technology for space power beaming // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 1992. V.40. No.6. P. 1251-1258. 24. *Glaser P.E.* An overview of the solar power satellite option // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 1992. V.40. No.6. P. 1230-1238. 25. *Разработка, изготовление и испытания ЛА с передачей энергии СВЧ лучом. Этап 1. Исследование возможности создания ЛА различных типов и назначения с передачей энергии на борт с помощью СВЧ луча*, Отчет о НИР / Московский авиационный институт; Руководитель А.К. Чурусов. 60500. Москва. 1993. 127с. 26. *Sohlesak J.J., Alden A., Ohno T.* SHARP (Stationary high altitude platform): rectenna and low altitude tests // Globecom 85: IEEE Glob. Telecommun. conf. New Orleans. 1985. V.2. P. 960-964. 27. *Jull G.W., Lillemark A., Turner R.M.* SHARP (Stationary high altitude platform): telecommunication missions and systems // Globecom 85: IEEE Glob. Telecommun. conf. New Orleans. 1985. V.2. P. 955-959. 28. *Ито Т., Fujino Y., Fujita M.* Fundamental experiment of a rectenna array for microwave power reception // IEICE Trans. Commun. 1993. V. E76-B. No.12. P.1508-1513. 29. *Chang K., Patton A.D., Kennedy M.O. and others* Demonstration of microwave power transmission in space // Int. Symp. on SPS, Paris, 1991. P.343-347. 30. *M.R.Riches* A comparative assessment of the reference satellite power system with selected current, Near-term and Advanced Energy Technologies, Department of Energy, Conf. Report, 800491, P.66-67, 1980. 31. *SPS 2000 News Letter*, Institute of Space and Astronautical Science, No.13, October 1995.